



# Dossier 2005 Argile Tome

## Évolution phénoménologique du stockage géologique

Juin 2005



**ANDRA**

Agence nationale  
pour la gestion des déchets radioactifs



Le présent document est le fruit d'un travail collectif dans lequel ont été impliqués aux côtés des agents de l'Andra, de nombreux partenaires et prestataires.

L'Andra a également souhaité, ainsi que cela lui avait été suggéré à la suite de l'examen du dossier 2001, associer des personnalités extérieures à la relecture du dossier 2005.

L'Andra tient ainsi à remercier vivement

- **Michel Bues** (Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie)
- **Hubert Doubre** (Professeur à l'Université Paris Sud)
- **Marc Panet** (Ingénieur Civil des Mines, Membre de l'Académie des Technologies)
- **Bernard Poty** (Directeur de recherche émérite du CNRS)

qui, au travers de leurs recommandations , ont accompagné la rédaction du présent document.



# Sommaire

---

<b>Sommaire .....</b>	<b>5</b>
<b>Table des illustrations .....</b>	<b>15</b>
<b>1 Introduction.....</b>	<b>27</b>
<b>1.1 L'objet du Tome dans le dossier 2005 Argile .....</b>	<b>29</b>
<b>1.2 Les données d'entrée .....</b>	<b>30</b>
<b>1.3 La structure du Tome « Evolution Phénoménologique ».....</b>	<b>31</b>
<b>1.4 La représentation des échelles de temps et d'espace des processus.....</b>	<b>32</b>
<b>1.5 La prédiction de l'évolution phénoménologique sur le long terme .....</b>	<b>32</b>
<b>2 Le site de Meuse / Haute-Marne, les déchets HAVL et les concepts de stockage.....</b>	<b>35</b>
<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>37</b>
<b>2.2 Le site de Meuse / Haute-Marne et la couche du Callovo-Oxfordien (Elion, 2005).....</b>	<b>38</b>
<b>2.3 Les déchets HAVL et les combustibles usés (Andra, 2005e) .....</b>	<b>42</b>
2.3.1 Les grandes catégories de déchets HAVL .....	43
2.3.2 Les combustibles usés (notés CU) après leur passage en réacteurs REP d'EDF ou en réacteurs expérimentaux du CEA.....	45
2.3.3 Les scénarios d'étude de la production des déchets.....	48
2.3.4 Les colis types de déchets primaires .....	48
<b>2.4 Les concepts de stockage (Andra, 2005i) .....</b>	<b>64</b>
2.4.1 La sûreté à long terme et la réversibilité .....	64
2.4.2 Les réponses de la conception à la sûreté et à la réversibilité .....	66
<b>2.5 Implications de l'architecture des ouvrages du stockage sur l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique .....</b>	<b>84</b>
2.5.1 Une simplification et une maîtrise de l'évolution phénoménologique .....	84
2.5.2 Des ouvrages à la typologie marquée vis-à-vis des comportements phénoménologiques .....	84
2.5.3 Des composants majeurs du milieu géologique et du stockage .....	86
<b>3 L'état initial du milieu géologique avant la réalisation du stockage .....</b>	<b>93</b>
<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>95</b>
<b>3.2 Le cadre général.....</b>	<b>95</b>
3.2.1 La géologie .....	97
3.2.2 Le cadre sismo-tectonique .....	102
3.2.3 L'hydrogéologie et la chimie des eaux .....	105
3.2.4 Le champ géothermal naturel.....	107

3.2.5	Le champ de contrainte mécanique naturel.....	108
<b>3.3</b>	<b>Les différentes formations géologiques.....</b>	<b>109</b>
3.3.1	La couche du Callovo-Oxfordien.....	109
3.3.2	Les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien .....	144
<b>3.4</b>	<b>La tectonique et la fracturation.....</b>	<b>154</b>
3.4.1	L'histoire tectonique du secteur.....	154
3.4.2	Les échelles de fracturation du secteur de Meuse / Haute-Marne.....	155
3.4.3	La zone de fracturation diffuse Marne/Poissons.....	158
3.4.4	L'impact de la fracturation sur les propriétés hydrauliques des formations .....	160
<b>3.5</b>	<b>L'environnement de surface .....</b>	<b>161</b>
3.5.1	Le climat .....	161
3.5.2	Du substratum géologique au modelé géomorphologique.....	162
3.5.3	Les ressources en eau (l'hydrologie de surface et l'hydrogéologie).....	163
3.5.4	Les sols .....	165
3.5.5	La flore et la faune .....	166
3.5.6	Les activités humaines .....	166
<b>3.6</b>	<b>Synthèse sur l'état initial du milieu géologique.....</b>	<b>167</b>
3.6.1	Sur le plan géologique : une structure simple et une couche du Callovo-Oxfordien homogène sur le secteur .....	167
3.6.2	Sur le plan thermique : un système géothermal exempt d'anomalie.....	168
3.6.3	Sur le plan hydraulique : un Callovo-Oxfordien à faible perméabilité et des écoulements lents dans les encaissants .....	168
3.6.4	Sur le plan chimique : des formations homogènes avec des eaux à l'équilibre faiblement alcalines de type carbonatées, sodi-calciques et réductrices.....	169
3.6.5	Sur le plan mécanique : un champ de contraintes naturelles simple et cohérent avec les connaissances à l'échelle du Bassin de Paris .....	170
3.6.6	Sur le plan de l'environnement de surface : des caractéristiques héritées de l'histoire climatique et de l'évolution géomorphologique .....	170
<b>4</b>	<b>Les processus phénoménologiques.....</b>	<b>171</b>
<b>4.1</b>	<b>Les grands processus phénoménologiques liés au stockage .....</b>	<b>173</b>
4.1.1	La charge thermique des déchets exothermiques.....	173
4.1.2	Les processus hydrauliques : la décharge hydraulique, la désaturation, la resaturation couplée à la production d'hydrogène, et le retour à un nouvel équilibre hydraulique .....	173
4.1.3	Les processus chimiques : des réactions d'interface au niveau des argilites en champ proche et des composants argileux, la corrosion des composants métalliques et la dégradation chimique des bétons .....	174
4.1.4	Les processus mécaniques de décharge et d'endommagement dans la couche du Callovo-Oxfordien autour du stockage, puis le rééquilibrage mécanique .....	174
<b>4.2</b>	<b>Les grands processus phénoménologiques liés à l'évolution géodynamique .....</b>	<b>175</b>
4.2.1	La géodynamique interne.....	175
4.2.2	Les changements climatiques.....	175
<b>4.3</b>	<b>Les échelles de temps des grands processus phénoménologiques et du relâchement et du transfert des radionucléides .....</b>	<b>175</b>

4.4	<b>L'organisation spatiale de l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique : indépendance et similitude .....</b>	<b>177</b>
<b>5</b>	<b>La charge thermique.....</b>	<b>181</b>
5.1	<b>Introduction.....</b>	<b>183</b>
5.2	<b>Les modes de transfert de la chaleur émise par les colis de déchets dans le stockage et dans les formations géologiques environnantes.....</b>	<b>183</b>
5.2.1	Dans le milieu géologique .....	183
5.2.2	Dans le stockage .....	185
5.3	<b>L'organisation spatiale de la charge thermique.....</b>	<b>187</b>
5.3.1	À l'échelle du stockage et du milieu géologique environnant .....	187
5.3.2	A l'échelle d'une zone de stockage.....	187
5.4	<b>Les charges thermiques des zones de stockage de déchets C et de combustibles usés .....</b>	<b>190</b>
5.4.1	À l'échelle d'une alvéole de stockage.....	190
5.4.2	À l'échelle d'un module de stockage.....	191
5.4.3	À l'échelle d'une zone de stockage.....	192
5.4.4	À l'échelle du site .....	192
5.5	<b>La charge thermique de la zone de stockage de déchets B.....</b>	<b>195</b>
5.6	<b>Synthèse sur la charge thermique du stockage .....</b>	<b>199</b>
5.6.1	L'indépendance thermique des zones de stockage.....	199
5.6.2	Des températures maximales atteintes à court terme dans les alvéoles de stockage .....	199
5.6.3	Une uniformisation des températures dans les modules de stockage et les zones de stockage .....	199
5.6.4	Des gradients thermiques globalement modérés.....	199
5.6.5	Une durée limitée de la charge thermique.....	200
5.6.6	Des charges thermiques faibles sur la couche du Callovo-Oxfordien « en grand » et sur les formations encaissantes.....	200
5.6.7	La sensibilité de l'analyse vis-à-vis du processus de gestion réversible.....	201
<b>6</b>	<b>Les écoulements et le transfert en solution et sous forme gazeuse.....</b>	<b>205</b>
6.1	<b>Introduction.....</b>	<b>207</b>
6.1.1	Les implications des écoulements sur les autres phénomènes .....	207
6.1.2	Les moteurs de l'évolution des écoulements .....	207
6.1.3	Une organisation spatiale des processus déterminée par la conception du stockage : indépendance et similitude.....	207
6.1.4	La structuration du chapitre .....	208
6.2	<b>Le comportement hydraulique des formations encaissantes sous l'effet du stockage.....</b>	<b>213</b>
6.2.1	La décharge hydraulique initiale.....	213
6.2.2	Le Tithonien : un retour rapide à un équilibre hydraulique .....	214
6.2.3	Le Kimméridgien et l'Oxfordien carbonaté : décharge hydraulique et désaturation.....	214
6.2.4	La fermeture du stockage et le retour à un nouvel équilibre hydraulique.....	218
6.2.5	L'évolution hydraulique des encaissants après la perturbation hydraulique liée au stockage.....	219

<b>6.3</b>	<b>Le comportement hydraulique du Callovo-Oxfordien sous l'effet du stockage.....</b>	<b>219</b>
6.3.1	La décharge hydraulique et la désaturation durant la phase d'exploitation.....	219
6.3.2	La resaturation du stockage en postfermeture et l'effet de l'hydrogène produit par la corrosion des métaux.....	231
6.3.3	Le transport des solutés dans le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'au retour à un nouvel équilibre hydraulique.....	254
6.3.4	Conclusion.....	256
<b>6.4</b>	<b>Synthèse sur les écoulements et le transfert en solution et sous forme gazeuse.....</b>	<b>259</b>
6.4.1	Un cadre pour les évolutions chimique et mécanique du stockage, puis le relâchement et le transfert des radionucléides.....	259
6.4.2	Deux moteurs spécifiques pour les écoulements.....	259
6.4.3	L'évolution hydraulique du stockage : l'implication de différents processus jusqu'au retour à un nouvel état d'équilibre hydraulique.....	260
6.4.4	Un transport des solutés qui est dominé par la diffusion dans le Callovo-Oxfordien.....	264
6.4.5	La production et la migration sous forme gazeuse de très faibles quantités de radionucléides.....	264
6.4.6	Une modification significative de l'écoulement et du transport dans les encaissants avec l'évolution géodynamique sur le million d'années.....	264
6.4.7	Les éléments phénoménologiques importants pour la réversibilité.....	265
<b>7</b>	<b>Les phénomènes chimiques.....</b>	<b>267</b>
<b>7.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>269</b>
7.1.1	Le résultat de déséquilibres.....	269
7.1.2	Une évolution concernant principalement le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche.....	270
7.1.3	L'indépendance et la similitude des évolutions chimiques.....	270
7.1.4	Deux catégories d'ouvrages en terme d'évolution chimique.....	270
7.1.5	L'organisation du chapitre.....	271
<b>7.2</b>	<b>L'évolution chimique des ouvrages ventilés pendant l'exploitation du stockage : alvéoles de déchets B, galeries et puits.....</b>	<b>272</b>
7.2.1	La perturbation oxydante dans les argilites en parois des ouvrages du fait de la désaturation.....	272
7.2.2	La carbonatation atmosphérique des bétons de structure.....	275
7.2.3	La corrosion des composants métalliques de structure.....	277
7.2.4	La perturbation alcaline des argilites par le béton des composants d'infrastructure.....	281
7.2.5	Les processus d'altération des colis de stockage de déchets B.....	281
7.2.6	Éléments de synthèse sur l'évolution chimique des ouvrages ventilés en phase d'exploitation.....	283
<b>7.3</b>	<b>L'évolution chimique des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés.....</b>	<b>284</b>
7.3.1	La corrosion du revêtement, du chemisage et des conteneurages en partie utile des alvéoles.....	285
7.3.2	L'évolution chimique de la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés.....	289

7.3.3	L'évolution chimique des argilites en champ proche des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés .....	292
7.3.4	La dissolution de la matrice vitreuse.....	293
7.3.5	Les assemblages de combustibles usés .....	298
7.3.6	La perturbation alcaline en tête d'alvéole .....	304
7.3.7	Les autres processus chimiques en tête des alvéoles de déchets C et de combustibles usés.....	309
<b>7.4</b>	<b>L'évolution chimique des alvéoles de déchets B en postfermeture.....</b>	<b>309</b>
7.4.1	Le passage à des conditions anoxiques puis réductrices.....	311
7.4.2	La dégradation chimique des matériaux cimentaires des alvéoles de déchets B.....	311
7.4.3	La dégradation des colis de déchets B (Andra, 2005d).....	316
7.4.4	La perturbation alcaline des argilites en champ proche des alvéoles de déchets B.....	323
<b>7.5</b>	<b>L'évolution chimique des scellements de galerie et de puits en postfermeture .....</b>	<b>326</b>
7.5.1	La perturbation alcaline des noyaux de scellement et des saignées par les composants en béton.....	326
7.5.2	La perturbation alcaline des argilites en champ proche des scellements de galerie et de puits .....	328
7.5.3	La corrosion des composants métalliques des scellements de galerie et de puits.....	328
<b>7.6</b>	<b>L'évolution chimique des galeries et des puits en postfermeture .....</b>	<b>328</b>
7.6.1	La dégradation chimique des composants cimentaires des puits .....	328
7.6.2	La perturbation alcaline dans le milieu géologique en champ proche des puits.....	329
7.6.3	La perturbation alcaline des remblais de galeries et de puits en postfermeture .....	329
<b>7.7</b>	<b>L'évolution chimique des argilites du Callovo-Oxfordien en champ lointain.....</b>	<b>330</b>
<b>7.8</b>	<b>L'évolution chimique des formations encaissantes (Dogger et Oxfordien carbonaté).....</b>	<b>330</b>
<b>7.9</b>	<b>Synthèse sur l'évolution chimique du stockage et de son environnement géologique .....</b>	<b>331</b>
7.9.1	Une composante importante de l'évolution phénoménologique du stockage .....	331
7.9.2	Une évolution chimique lente et affectant principalement le stockage et le Callovo-Oxfordien en champ très proche .....	331
7.9.3	Un ensemble limité de processus majeurs .....	332
7.9.4	Éléments phénoménologiques importants pour la réversibilité .....	334
<b>8</b>	<b>L'évolution mécanique du stockage et du milieu géologique environnant .....</b>	<b>337</b>
<b>8.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>339</b>
8.1.1	Une composante de l'évolution phénoménologique du stockage.....	339
8.1.2	L'effet du comportement mécanique intrinsèque des argilites et des évolutions thermique, hydraulique et chimique du stockage.....	339
8.1.3	Une évolution concernant principalement le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche.....	340
8.1.4	L'indépendance et la similitude de l'évolution mécanique.....	340

8.1.5	Les trois catégories d'ouvrage en terme d'évolution mécanique.....	340
8.1.6	L'organisation du chapitre sur le comportement mécanique .....	341
<b>8.2</b>	<b>La création d'une EDZ initiale : le creusement des ouvrages et la décharge mécanique instantanée .....</b>	<b>341</b>
8.2.1	Des comportements mécaniques différents selon les formations géologiques traversées .....	343
8.2.2	Une EDZ initiale variable selon la profondeur considérée et l'orientation de l'ouvrage.....	345
8.2.3	L'extension de l'EDZ initiale autour des différents ouvrages de stockage .....	346
8.2.4	La convergence associée à la décharge mécanique initiale.....	350
8.2.5	La perméabilité de l'EDZ initiale .....	352
<b>8.3</b>	<b>L'évolution mécanique des ouvrages ventilés durant la phase d'exploitation du stockage : les galeries, les alvéoles de déchets B et les puits.....</b>	<b>354</b>
8.3.1	Les contextes thermique, hydraulique et chimique.....	354
8.3.2	Les puits, les alvéoles de déchets B et les galeries non soumises à une élévation de la température .....	357
8.3.3	Les galeries soumises à une élévation de la température .....	360
<b>8.4</b>	<b>L'évolution mécanique des alvéoles de déchets B et des galeries en phase de postfermeture .....</b>	<b>360</b>
8.4.1	La fermeture des alvéoles de déchets B et des galeries.....	360
8.4.2	La mise en charge du soutènement/revêtement et le début de la cicatrisation de l'EDZ.....	362
8.4.3	L'évolution mécanique avec la dégradation chimicomécanique progressive des composants des ouvrages .....	364
<b>8.5</b>	<b>L'évolution mécanique des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés .....</b>	<b>366</b>
8.5.1	Les comportements mécaniques de la partie utile et de la tête d'alvéole.....	366
8.5.2	Les contextes thermique, hydraulique et chimique.....	367
8.5.3	L'organisation temporelle de l'évolution mécanique des alvéoles .....	367
8.5.4	La mise en charge thermomécanique du fait de la mise en place des colis et la mise en place du bouchon d'alvéole.....	371
8.5.5	La saturation de l'argile gonflante du bouchon et de la barrière ouvragée (environ 100 ans) .....	373
8.5.6	L'évolution mécanique jusqu'à la rupture du chemisage et/ou du revêtement.....	376
8.5.7	L'évolution mécanique après la rupture des chemisage et revêtement et avant la rupture des (sur)conteneurs .....	379
8.5.8	L'évolution mécanique avec la corrosion des (sur)conteneurs .....	382
<b>8.6</b>	<b>L'évolution mécanique des scellements .....</b>	<b>384</b>
8.6.1	La réalisation des scellements.....	384
8.6.2	Les contextes thermique, hydraulique et chimique de l'évolution mécanique des scellements après la fermeture.....	389
8.6.3	La phase de saturation des scellements et le développement de la pression de gonflement .....	392
8.6.4	Après resaturation, au fur et à mesure de l'évolution des propriétés mécaniques des massifs d'appui et des soutènements/revêtements .....	394
8.6.5	Dans les formations sus-jacentes à la couche du Callovo-Oxfordien .....	396
<b>8.7</b>	<b>L'évolution mécanique à grande échelle.....</b>	<b>397</b>
8.7.1	Les effets du stockage.....	397

8.7.2	Les effets de l'érosion et de la sismicité .....	397
<b>8.8</b>	<b>Synthèse sur l'évolution mécanique du stockage et du milieu géologique environnant .....</b>	<b>399</b>
8.8.1	Un impact mécanique du stockage limité au champ proche dans le Callovo-Oxfordien .....	399
8.8.2	L'absence de conséquence significative sur les évolutions hydraulique et chimique du milieu géologique.....	400
8.8.3	Une évolution mécanique du stockage et du Callovo-Oxfordien en champ proche marquée par trois grandes périodes .....	400
8.8.4	Éléments vis-à-vis de la réversibilité .....	401
8.8.5	D'une évolution limitée de l'EDZ initiale à sa cicatrisation.....	402
8.8.6	Le maintien des propriétés hydrauliques des bouchons d'alvéoles et des scellements dans le temps .....	403
<b>9</b>	<b>L'évolution géodynamique du Callovo-Oxfordien, des formations géologiques encaissantes et de l'environnement de surface .....</b>	<b>405</b>
<b>9.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>407</b>
<b>9.2</b>	<b>La géodynamique interne.....</b>	<b>407</b>
<b>9.3</b>	<b>Les évolutions climatiques.....</b>	<b>408</b>
<b>9.4</b>	<b>Les conséquences des évolutions climatiques .....</b>	<b>414</b>
9.4.1	La mise en place et le retrait périodique d'un pergélisol .....	414
9.4.2	L'évolution des biosphères .....	416
<b>9.5</b>	<b>Les modifications de la topographie.....</b>	<b>418</b>
<b>9.6</b>	<b>Les effets des évolutions sur les formations géologiques et les environnements de surface.....</b>	<b>421</b>
9.6.1	Le Callovo-Oxfordien.....	421
9.6.2	Les formations encaissantes.....	421
9.6.3	L'environnement de surface.....	424
<b>9.7</b>	<b>Synthèse sur les évolutions géodynamiques des formations géologiques et des environnements de surface .....</b>	<b>425</b>
9.7.1	La couche du Callovo-Oxfordien.....	425
9.7.2	Les formations encaissantes.....	426
9.7.3	Les environnements de surface .....	426
<b>10</b>	<b>Le relâchement et le transfert des radionucléides .....</b>	<b>429</b>
<b>10.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>431</b>
10.1.1	Le relâchement et le transfert des radionucléides : des phénomènes pilotes par l'évolution du stockage .....	431
10.1.2	L'organisation du chapitre sur le relâchement et le transfert des radionucléides .....	431
<b>10.2</b>	<b>Le relâchement des radionucléides par les colis de déchets .....</b>	<b>433</b>
10.2.1	Les colis de déchets C.....	433
10.2.2	Les colis de combustibles usés.....	434
10.2.3	Les colis de déchets B.....	437
<b>10.3</b>	<b>Le transfert des radionucléides dans les ouvrages du stockage.....</b>	<b>443</b>

10.3.1	Les conditions physico-chimiques dans les alvéoles du stockage .....	445
10.3.2	La rétention des radionucléides dans les alvéoles de stockage .....	448
10.3.3	Le transfert des radionucléides dans le stockage : les voies de transfert et les temps caractéristiques .....	455
<b>10.4</b>	<b>Le transfert des radionucléides en solution dans la couche du Callovo- Oxfordien depuis le stockage vers les formations encaissantes .....</b>	<b>457</b>
10.4.1	L'état phénoménologique de la couche du Callovo-Oxfordien dans le temps au regard des temps de relâchement des radionucléides par les colis de déchets .....	457
10.4.2	Le transfert dans la couche du Callovo-Oxfordien .....	458
<b>10.5</b>	<b>Le transfert des radionucléides en solution dans les formations encaissantes .....</b>	<b>465</b>
10.5.1	Les caractéristiques générales du transfert dans les formations encaissantes et les effets de l'évolution géodynamique .....	465
10.5.2	Le transfert des radionucléides mobiles sortant de la couche du Callovo- Oxfordien .....	469
<b>10.6</b>	<b>Le transfert des radionucléides vers la biosphère et l'homme.....</b>	<b>471</b>
10.6.1	Le modèle global de transfert des radionucléides dans la biosphère : transferts directs et indirects .....	472
10.6.2	Le transfert des radionucléides dans la biosphère actuelle pour les zones de plateaux du site de Meuse / Haute-Marne .....	476
10.6.3	Le transfert des radionucléides dans la biosphère actuelle pour les zones de vallées.....	478
10.6.4	L'effet de l'évolution géodynamique sur le transfert des radionucléides .....	478
<b>10.7</b>	<b>Synthèse sur le relâchement et le transfert des radionucléides.....</b>	<b>480</b>
10.7.1	Les effets des évolutions thermique, hydraulique, chimique, mécanique et géomorphologique sur le relâchement et le transfert des radionucléides .....	480
10.7.2	Des radionucléides aux comportements spécifiques en terme de solubilité et de rétention.....	481
10.7.3	Un relâchement lent et limité des radionucléides hors du stockage.....	481
10.7.4	Une migration des radionucléides à vie longue très solubles et non sorbés dans la couche du Callovo-Oxfordien .....	482
10.7.5	Un transfert des radionucléides dans les encaissants influencé par les évolutions géodynamiques.....	482
10.7.6	Le transfert des radionucléides dans la biosphère et vers l'homme.....	483
10.7.7	Les éléments phénoménologiques importants pour la réversibilité .....	483
<b>11</b>	<b>Incertitudes sur la description phénoménologique .....</b>	<b>485</b>
<b>11.1</b>	<b>Incertitude sur le mode d'exploitation et de fermeture du stockage.....</b>	<b>487</b>
<b>11.2</b>	<b>Examen des incertitudes sur les données disponibles et les interprétations phénoménologiques.....</b>	<b>488</b>
11.2.1	Les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien.....	488
11.2.2	Le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche.....	489
11.2.3	Les formations encaissantes.....	492
11.2.4	La représentation des couplages .....	493
<b>11.3</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>494</b>
<b>12</b>	<b>Synthèse générale .....</b>	<b>495</b>

<b>12.1</b>	<b>Les grands traits caractéristiques de la démarche.....</b>	<b>497</b>
<b>12.2</b>	<b>La description d'ensemble des phénomènes et de l'histoire du stockage .....</b>	<b>498</b>
12.2.1	Une évolution marquée par les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien et la conception du stockage.....	498
12.2.2	Une évolution combinant des processus d'importance inégale dans le temps.....	499
12.2.3	Une évolution très limitée de la couche du Callovo-Oxfordien en grand sur le million d'années par rapport à son état actuel.....	500
12.2.4	Une évolution des écoulements dans les encaissants sur le million d'années .....	500
12.2.5	Un lent relâchement des radionucléides par les colis de déchets gouverné par les installations de stockage et le milieu géologique .....	501
<b>12.3</b>	<b>Les enseignements.....</b>	<b>501</b>
	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>503</b>



## Table des illustrations

---

### Encadrés

Encadré 2.1	Les éléments radioactifs dans les assemblages de combustibles usés formés en réacteurs .....	42
Encadré 2.2	La liste des 144 radionucléides retenus dans le modèle d'inventaire des déchets HAVL et des combustibles usés .....	59
Encadré 2.3	Les rayonnements émis par les radionucléides .....	62
Encadré 2.4	L'origine du dégagement thermique des déchets HAVL et des combustibles usés.....	63
Encadré 2.5	Les critères thermiques retenus pour la conception du stockage .....	68
Encadré 2.6	Les argiles gonflantes (Andra, 2005f, Tome 1) .....	87
Encadré 2.7	L'argile gonflante méthodologique MX80 retenue pour les études sur le stockage (Andra, 2005f, Tome 1) .....	89
Encadré 2.8	Les matériaux cimentaires du stockage (Andra, 2005f, Tome 2) .....	90
Encadré 2.9	Les matériaux métalliques du stockage (Andra, 2005f, Tome 3) .....	91
Encadré 3.1	Les traceurs géochimiques et isotopiques : Principes et utilisations (1/2).....	116
Encadré 3.2	La définition de la zone de transposition autour du site de Meuse / Haute-Marne .....	119
Encadré 3.3	La structuration de l'eau dans les argilites du Callovo-Oxfordien .....	124
Encadré 3.4	L'écoulement d'eau dans les milieux poreux naturels : la loi de Darcy .....	125
Encadré 3.5	Les phénomènes à l'origine de surpressions dans des formations argileuses profondes (1/2).....	127
Encadré 3.6	L'osmose chimique dans un milieu poreux .....	130
Encadré 3.7	Les phénomènes de transfert de solutés dans les milieux poreux (Carnahan, 1985) .....	135
Encadré 3.8	L'équation de transport des solutés dans les milieux poreux (1/2).....	136
Encadré 3.9	L'exclusion anionique dans les argilites du Callovo-Oxfordien.....	138
Encadré 4.1	Les interactions phénoménologiques dans la couche du Callovo-Oxfordien : Estimation des temps et des distances caractéristiques d'interactions thermique, hydraulique et chimique.....	178
Encadré 5.1	Les méthodes d'évaluation de la charge thermique du stockage .....	184
Encadré 5.2	Les modes de transfert de la chaleur .....	185
Encadré 6.1	La production d'hydrogène dans le stockage (1/2).....	209
Encadré 6.2	La modélisation des phénomènes hydrauliques (1/2) .....	211
Encadré 6.3	La notion de degré de saturation en eau.....	217
Encadré 6.4	L'hygrométrie relative de l'air et la succion d'un milieu poreux en équilibre .....	223
Encadré 6.5	Les courbes sorption - désorption des milieux poreux .....	226

Encadré 6.6	Les pressions d'entrée de gaz des milieux poreux .....	227
Encadré 6.7	Le modèle conceptuel du transport de gaz dans les milieux argileux denses (1/2).....	238
Encadré 7.1	L'oxydation de la pyrite (FeS <sub>2</sub> ).....	274
Encadré 7.2	La carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires (1/2).....	276
Encadré 7.3	La corrosion des aciers non ou faiblement alliés (1/3) (Andra, 2005f, Tome 3) .....	279
Encadré 7.4	La radio-oxydation de la matrice bitume des boues bitumées .....	283
Encadré 7.5	Les interactions fer (métal) / argile (argilites et argile gonflante...).....	292
Encadré 7.6	La structure des verres (boro)silicatés .....	294
Encadré 7.7	Les phases de dissolution des verres silicatés .....	296
Encadré 7.8	La dissolution des verres silicatés .....	297
Encadré 7.9	La structure des pastilles d'oxydes et des gaines des assemblages de combustibles usés.....	299
Encadré 7.10	La radiolyse de l'eau.....	302
Encadré 7.11	La dissolution radiolytique des pastilles d'oxydes UO <sub>2</sub> / PuO <sub>2</sub> (1/2).....	303
Encadré 7.12	La perturbation alcaline dans les argiles (argilites et argiles gonflantes) .....	308
Encadré 7.13	La réactivité sous eau des matériaux cimentaires .....	312
Encadré 7.14	La dégradation aqueuse des boues bitumées (colis types B2) .....	322
Encadré 8.1	L'EDZ ou la zone endommagée autour des ouvrages du stockage.....	342
Encadré 8.2	La loi de comportement mécanique à court terme des argilites du Callovo-Oxfordien (1/2) .....	344
Encadré 8.3	Le comportement mécanique différé des argilites du Callovo-Oxfordien .....	351
Encadré 8.4	Le comportement couplé hydromécanique des argilites du Callovo-Oxfordien .....	356
Encadré 8.5	Le comportement couplé thermo-hydro-mécanique des argilites .....	357
Encadré 10.1	Les toxiques chimiques.....	432
Encadré 10.2	Le comportement des radionucléides dans les produits d'altération des verres.....	433
Encadré 10.3	La localisation et la répartition des radionucléides dans les assemblages de combustibles usés.....	436
Encadré 10.4	La localisation et la répartition des radionucléides dans les déchets de types B4 et B5 .....	440
Encadré 10.5	Les propriétés de sorption des argiles .....	443
Encadré 10.6	La description de la rétention et du transport des solutés dans un milieu poreux .....	444
Encadré 10.7	La solubilité et la sorption des radionucléides dans les argiles gonflantes (1/2).....	449
Encadré 10.8	Les complexants organiques contenus dans les déchets B ou issus de la dégradation des déchets B organiques .....	452

Encadré 10.9	La solubilité et la sorption des radionucléides dans les matériaux cimentaires (1/2) .....	453
Encadré 10.10	Les radionucléides gazeux dans les conditions du stockage.....	457
Encadré 10.11	La solubilité et la sorption des radionucléides dans les argilites du Callovo-Oxfordien (1/2) .....	463
Encadré 10.12	Le modèle de transfert des radionucléides dans les sols .....	474
Encadré 10.13	Le modèle de transfert des radionucléides aux végétaux.....	476

## Figures

Figure 1.1.1	Structure générale du dossier 2005 Argile.....	29
Figure 2.2.1	Localisation géographique du site de Meuse / Haute-Marne.....	38
Figure 2.2.2	Localisation géologique du site de Meuse / Haute-Marne au sein du Bassin Parisien.....	38
Figure 2.2.3	Coupe géologique au niveau du site de Meuse / Haute-Marne.....	39
Figure 2.2.4	Bloc diagramme géologique 3D du site de Meuse / Haute-Marne .....	40
Figure 2.2.5	Localisation de la zone de transposition autour du site de Meuse / Haute-Marne et position des forages réalisés par l'Andra sur le secteur.....	41
Figure 2.3.1	Schéma d'un colis primaire de déchets C vitrifiés avec écorché et photographie montrant la matrice vitreuse.....	43
Figure 2.3.2	Schéma d'un colis B de coques et embouts et de déchets technologiques compactés (colis type B5, cf. Tableau 2.3.2).....	45
Figure 2.3.3	Schéma d'un assemblage de combustible REP.....	46
Figure 2.3.4	Schéma d'un assemblage de combustibles usés avec écorché et coupes d'un crayon de combustibles usés, après passage en réacteur .....	47
Figure 2.3.5	Schéma de principe de la localisation des radionucléides au sein d'un crayon de combustibles usés et d'une pastille d'oxyde type UOX, après passage en réacteur .....	47
Figure 2.3.6	Schéma et dimensions des colis types de déchets vitrifiés.....	50
Figure 2.3.7	Schéma et dimensions des colis types de déchets B .....	52
Figure 2.3.8	Activité en produits d'activation (PA) / produits de fission (PF) de chaque colis type (vie courte : 6 mois < période ≤ 6 ans ; vie moyenne : 6 ans < période ≤ 30 ans ; vie longue : période > 30 ans).....	56
Figure 2.3.9	Activité en actinides de chaque colis type (vie courte : 6 mois < période ≤ 6 ans ; vie moyenne : 6 ans < période ≤ 30 ans ; vie longue : période > 30 ans).....	56
Figure 2.3.10	Distributions relatives en % des inventaires en <sup>14</sup> C, <sup>36</sup> Cl, <sup>59</sup> Ni, <sup>94</sup> Nb, <sup>99</sup> Tc, <sup>129</sup> I, et <sup>135</sup> Cs entre les déchets B, les déchets C et les combustibles usés (hors CU3) pour les quatre scénarios de production des déchets.....	57
Figure 2.3.11	Distributions relatives en % des inventaires en <sup>14</sup> C, <sup>36</sup> Cl, <sup>59</sup> Ni, <sup>94</sup> Nb, <sup>99</sup> Tc, <sup>129</sup> I, et <sup>135</sup> Cs entre les colis types de déchets B pour le scénario de gestion des combustibles nucléaires S1b.....	58
Figure 2.3.12	Courbes des dégagements thermiques (i.e. puissances thermiques) des colis types de déchets C et des colis types de combustibles usés (Andra, 2005e).....	60

Figure 2.3.13	Courbes des dégagements thermiques (i.e. puissances thermiques) des colis types de déchets B (Andra, 2005e) .....60
Figure 2.4.1	Schéma de la localisation du stockage au milieu de la couche du Callovo-Oxfordien (localisation de référence du laboratoire de recherche souterrain) .....66
Figure 2.4.2	Exemple d'organisation générale du stockage (cas du scénario de production des déchets S1a).....70
Figure 2.4.3	Schéma d'un colis de stockage de déchets B .....72
Figure 2.4.4	Schéma d'un colis de stockage de déchets C .....73
Figure 2.4.5	Schéma d'un colis de stockage de combustibles usés CU1 .....74
Figure 2.4.6	Schéma de principe d'une alvéole de stockage de colis de déchets B en configuration d'exploitation.....75
Figure 2.4.7	Schéma de principe d'une alvéole de stockage de colis de déchets C en configuration d'exploitation.....76
Figure 2.4.8	Schéma de principe d'une alvéole de stockage de déchets C remplie de colis de stockage et en configuration d'exploitation.....77
Figure 2.4.9	Schéma de principe d'une alvéole de stockage de combustibles usés remplie de colis de stockage et en configuration d'exploitation.....77
Figure 2.4.10	Schéma de principe d'une alvéole de stockage de déchets C scellée.....79
Figure 2.4.11	Schéma de principe d'une alvéole de stockage de colis de combustibles usés scellée.....80
Figure 2.4.12	Schéma de principe d'un scellement de galeries : coupe longitudinale .....81
Figure 2.4.13	Schéma de principe d'une alvéole de déchets B scellée : vue 3D.....81
Figure 2.4.14	Schéma de principe d'un scellement d'alvéole de déchets B : coupe longitudinale .....82
Figure 2.4.15	Schéma de principe d'un scellement de puits d'accès : coupe longitudinale.....83
Figure 3.2.1	Données disponibles et localisation des travaux menés par l'Andra sur le secteur de Meuse / Haute-Marne .....96
Figure 3.2.2	Schématisation de la formation du bassin de Paris depuis le Paléozoïque jusqu'à l'Actuel.....98
Figure 3.2.3	Bloc diagramme 3D de la structure géologique du bassin de Paris .....99
Figure 3.2.4	Succession lithologique à l'aplomb du site de Meuse / Haute-Marne .....100
Figure 3.2.5	Bloc diagramme 3D de la structure géologique du secteur de Meuse / Haute-Marne .....101
Figure 3.2.6	Bloc diagramme 3D de la lithologie et du relief du secteur de Meuse / Haute-Marne .....103
Figure 3.2.7	Cadre géodynamique de l'Est de la France : relation entre la sismicité et l'épaisseur de la croûte terrestre (Andra, 2005h, chapitre 35) .....104
Figure 3.2.8	Bloc diagramme 3D des systèmes hydrogéologiques du secteur de Meuse / Haute-Marne .....106
Figure 3.2.9	Profil des températures géothermales de la série sédimentaire sur le site de Meuse / Haute-Marne (Bauer, 2005) .....107
Figure 3.2.10	Orientation de l'état de contrainte mécanique actuel sur le secteur de Meuse / Haute-Marne (Andra, 2005h ; Grellet et al., 1993) .....108
Figure 3.3.1	Géométrie de la série sédimentaire sur le secteur de Meuse / Haute-Marne.....109

Figure 3.3.2	Isohypses du toit du Callovo-Oxfordien sur le secteur de Meuse / Haute-Marne (en m NGF).....	110
Figure 3.3.3	Épaisseur du Callovo-Oxfordien sur le secteur de Meuse / Haute-Marne (à droite) déterminées à partir des isohypses du toit et du mur de la formation (à gauche).....	110
Figure 3.3.4	Organisation verticale du Callovo-Oxfordien à l’aplomb du site de Meuse / Haute-Marne .....	112
Figure 3.3.5	Homogénéité latérale du Callovo-Oxfordien sur le secteur de Meuse / Haute-Marne .....	113
Figure 3.3.6	Représentation schématique du dépôt des 3 séquences du Callovo-Oxfordien .....	113
Figure 3.3.7	Teneurs en calcite, composition isotopique en Sr et $\delta^{13}\text{C}$ de la calcite sur le forage HTM 102 (d’après (Lavastre, 2002 ; Maes, 2002) – Domaine des calcites marines pour $\delta^{13}\text{C}$ selon (Podlaha et al., 1998), domaine de composition isotopique en Sr de l’eau de mer callovo-oxfordienne selon (Koepnick et al., 1990)) .....	115
Figure 3.3.8	Schémas de la texture et de la porosité des argilites du Callovo-Oxfordien.....	121
Figure 3.3.9	Modèle conceptuel de la porosité des argilites du Callovo-Oxfordien (d’après les mesures de porosimétrie mercure et les courbes d’adsorption d’azote) (Andra, 2005h, chapitre 12).....	122
Figure 3.3.10	Profil des charges apparentes mesurées dans le Callovo-Oxfordien à l’aplomb du laboratoire souterrain de Meuse / Haute-Marne (compilation des mesures disponibles fin mars 2005) .....	126
Figure 3.3.11	Représentation schématique du Callovo-Oxfordien et de ses encaissants dans le contexte d’un système osmotique .....	129
Figure 3.3.12	Évaluation du gradient de charge hydraulique vertical au travers du Callovo-Oxfordien, déduit des charges dans les encaissants .....	133
Figure 3.3.13	Profil vertical sur l’ensemble du Callovo-Oxfordien des valeurs mesurées du coefficient de diffusion de l’eau tritiée (HTO) .....	139
Figure 3.3.14	Profils verticaux des teneurs en chlorures dans le Callovo-Oxfordien et ses encaissants à l’échelle du secteur.....	141
Figure 3.3.15	Représentation schématique des lithologies et des horizons poreux dans le Dogger calcaire sur le site de Meuse / Haute-Marne .....	146
Figure 3.3.16	Organisation des écoulements d’eau dans le Dogger calcaire à l’état actuel.....	146
Figure 3.3.17	Champs de charge hydraulique et teneur en chlore des eaux du Dogger calcaire sur le secteur de Meuse / Haute-Marne .....	147
Figure 3.3.18	Environnement de dépôt d’une plateforme de l’Oxfordien carbonaté - Exemple de la plateforme terminale de l’Oxfordien moyen d’après (Carpentier, 2004 ; Université de Lyon I, 2002).....	148
Figure 3.3.19	Morphologie des horizons poreux à partir des données de sismique 3D - Hp1 à Hp4.....	149
Figure 3.3.20	Extension des faciès poreux de l’Oxfordien moyen sur le secteur de Meuse / Haute-Marne .....	151
Figure 3.3.21	Représentation des niveaux poreux dans l’Oxfordien carbonaté à l’état actuel.....	151
Figure 3.3.22	Organisation des écoulements d’eau dans l’Oxfordien carbonaté à l’état actuel.....	152

Figure 3.3.23	Représentation schématique du Kimméridgien marneux.....	153
Figure 3.3.24	Représentation schématique des Calcaires du Barrois.....	154
Figure 3.4.1	Les différentes structures tectoniques sur le secteur de Meuse / Haute-Marne .....	156
Figure 3.4.2	Représentation de la microfracturation dans le Callovo-Oxfordien.....	157
Figure 3.4.3	Limites de la zone de fracturation diffuse Marne/Poissons .....	160
Figure 3.5.1	Variation de la température et de la pluviométrie moyennes à Saint-Dizier.....	162
Figure 3.5.2	Les différents modelés morphologiques autour du site de Meuse / Haute-Marne à l'actuel .....	163
Figure 3.5.3	Représentation schématique des écoulements de surface sur le site de Meuse / Haute-Marne à l'actuel, et leur relation avec les unités lithologiques.....	164
Figure 3.5.4	Répartition schématique des différents sols sur le site de Meuse / Haute-Marne à l'actuel .....	165
Figure 3.5.5	Répartition schématique des grands ensembles naturels sur le site de Meuse / Haute-Marne à l'actuel.....	166
Figure 3.6.1	Représentation schématique des écoulements et du transport des solutés dans le milieu géologique à l'état initial .....	169
Figure 4.3.1	Chronogramme des phénomènes majeurs affectant le stockage et son environnement géologique (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage).....	176
Figure 5.3.1	La charge thermique des différentes zones de stockage à l'échelle du site .....	189
Figure 5.4.1	Evolution de la température dans et autour d'une alvéole de déchets C1 (durée d'entreposage de 60 ans).....	191
Figure 5.4.2	Evolution de la température dans et autour d'une alvéole de combustibles usés CU2 (durée d'entreposage de 90 ans).....	191
Figure 5.4.3	Évolution de la température au cœur des galeries d'accès aux alvéoles de combustibles usés CU2 (durée d'entreposage de 90 ans) et aux alvéoles de déchets C1 (durée d'entreposage de 60 ans) dans l'hypothèse d'un remblayage rapide des galeries d'accès (30 ans après la mise en place des colis).....	192
Figure 5.4.4	Représentation de la charge thermique de la zone de stockage des déchets C à différents temps (scénario de gestion des combustibles usés S1a).....	193
Figure 5.4.5	Représentation de la charge thermique des zones de stockage des combustibles usés à différents temps (scénario de gestion des combustibles usés S2).....	194
Figure 5.5.1	Évolution de la température dans et autour d'une alvéole de déchets B de structure (colis types B5.2 mis en stockage après une durée d'entreposage de 10 ans) et d'une alvéole de boues bitumées (colis types B2.1 mis en stockage après une durée d'entreposage d'1 an) : sans période de ventilation après mise en place des colis.....	196
Figure 5.5.2	Évolution de la température dans et autour d'une alvéole de colis types B5.2 (mis en stockage après une durée d'entreposage de 10 ans) : sans période de ventilation après mise en place des colis et avec une ventilation maintenue durant 10 ans .....	197

Figure 5.5.3	Représentation de la charge thermique de la zone de stockage des déchets B à différents temps avec l'hypothèse d'une fermeture immédiate des alvéoles après la mise en place des colis .....198
Figure 5.6.1	Chronogramme de la charge thermique des différentes zones de stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien « en grand » (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage).....204
Figure 6.2.1	Schémas des écoulements et du profil de charge initial dans le Callovo-Oxfordien et ses encaissants .....213
Figure 6.2.2	Schéma des perturbations hydrauliques engendrées par le stockage dans le Callovo-Oxfordien et ses encaissants pendant la phase d'exploitation .....214
Figure 6.2.3	Représentation schématique de la décharge hydraulique créée par les puits dans l'horizon Hp1-4 de l'Oxfordien carbonaté .....216
Figure 6.3.1	Représentation de l'évolution de la température et de l'hygrométrie relative de l'air le long d'un circuit de ventilation schématique à l'échelle du stockage .....221
Figure 6.3.2	Schéma général du processus de désaturation lié à la ventilation en phase d'exploitation et à la génération d'hydrogène en phase de postfermeture (Dimensions des ouvrages et importance des phénomènes non respectées).....225
Figure 6.3.3	Représentation schématique du profil du degré de saturation quasi stationnaire atteint dans et autour d'une galerie après une durée d'ouverture d'au moins dix ans .....228
Figure 6.3.4	Évolution dans le temps du profil de pression hydraulique dans les argilites autour d'une galerie ouverte pendant plusieurs dizaines d'années et soumise à une charge thermique .....230
Figure 6.3.5	Évolution dans le temps du profil de pression hydraulique dans les argilites autour d'une alvéole de combustibles usés .....230
Figure 6.3.6	Schéma des principales voies de migration de l'hydrogène depuis une alvéole de combustibles usés vers sa galerie d'accès, avant et après resaturation du bouchon.....235
Figure 6.3.7	Schéma général de la resaturation du stockage (la partie supérieure des scellements de puits est resaturée par de l'eau en provenance de l'Oxfordien carbonaté, le reste du stockage est resaturé par des eaux en provenance du Callovo-Oxfordien) .....236
Figure 6.3.8	Schéma des voies de transfert de l'hydrogène dans le stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien environnant.....237
Figure 6.3.9	Courbes d'isopression en eau dans le Callovo-Oxfordien autour d'une galerie d'un module de stockage de combustibles usés (au moment de la pression maximale d'hydrogène, soit environ 2 000 ans). Les écoulements d'eau sont divergents de la galerie vers les argilites. Dans cette figure, l'échelle des ordonnées est dilatée d'un facteur 15.....242
Figure 6.3.10	Courbes d'isopression en eau dans le Callovo-Oxfordien autour d'une galerie d'un module de stockage de combustibles usés à 9 000 ans environ. Les écoulements d'eau sont convergents vers la galerie. Dans cette figure, l'échelle des ordonnées est dilatée d'un facteur 15.....243
Figure 6.3.11	Schéma de l'écoulement d'eau à l'échelle du stockage après sa resaturation totale.....244
Figure 6.3.12	Exemple de lignes d'écoulement d'eau passant par le stockage après retour à l'équilibre hydraulique : La majeure partie des lignes de courant

	transitant par le stockage rejoignent les argilites du Callovo-Oxfordien et n'aboutissent pas au puits .....	245
Figure 6.3.13	Schéma des charges hydrauliques dans les couches géologiques après retour à un équilibre hydraulique.....	246
Figure 6.3.14	Schéma de la resaturation d'une alvéole de déchets B. Évolution des écoulements de l'eau avant et après suintement dans les jeux de mise en place. Zoom sur les empilements de colis.....	248
Figure 6.3.15	Chronogramme donnant l'état de saturation en eau des différents composants d'un module de stockage de déchets B, et les effets et couplages associés (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage).....	249
Figure 6.3.16	Chronogramme donnant la pression d'hydrogène dans les différents composants d'un module de stockage de déchets B, et les effets et couplages associés (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage).....	250
Figure 6.3.17	Chronogramme donnant l'état de saturation en eau des différents composants d'un module de stockage de déchets C ou d'un module de combustibles usés (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage).....	252
Figure 6.3.18	Chronogramme donnant la pression d'hydrogène dans les différents composants d'un module de stockage de déchets C ou d'un module de combustibles usés (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage).....	253
Figure 6.3.19	Schéma des modes de transport des solutés à l'échelle du Callovo-Oxfordien et de ses encaissants sur le site de Meuse / Haute-Marne, après retour à l'équilibre hydraulique .....	256
Figure 6.3.20	Représentation schématique des débits d'eau transitant par le stockage et des modes de migration des solutés dans le stockage, après retour à l'équilibre hydraulique.....	258
Figure 7.3.1	Représentation schématique de la corrosion du chemisage et du surconteneur dans une alvéole de déchets C, à quelques centaines d'années, quelques milliers d'années et plusieurs dizaines de milliers d'années.....	287
Figure 7.3.2	Représentation schématique de la corrosion du chemisage, du conteneur et de l'insert dans une alvéole de combustibles usés, à quelques centaines d'années, quelques milliers d'années et plusieurs dizaines de milliers d'années .....	288
Figure 7.3.3	Représentation schématique de la perturbation fer / barrière ouvragée en argile gonflante d'une alvéole de combustibles usés, après quelques dizaines de milliers d'années .....	291
Figure 7.3.4	Représentation simplifiée de la dissolution d'un verre R7T7 (colis types C2) dans le temps (Andra, 2005m) .....	295
Figure 7.3.5	Représentation simplifiée de l'évolution de la dissolution des pastilles d'oxyde d'un combustible usé CU1 UOX3 long dans le temps (Andra, 2005d ; Andra, 2005m).....	301
Figure 7.3.6	Schéma de la perturbation alcaline d'un bouchon d'argile gonflante d'une alvéole de déchets C, à 100 000 ans.....	306
Figure 7.4.1	Schéma de la progression de la dégradation des revêtement / soutènement en béton de type CEM V d'une alvéole de déchets B (Bourbon, 2005) .....	314

Figure 7.4.2	Évolution des débits de dose ( $\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ ) au contact des colis primaires de déchets B (évaluation sur le côté du colis) (Andra, 2005a) .....317
Figure 7.4.3	Représentation simplifiée de l'évolution de la dégradation des boues bitumées dans le temps (Andra, 2005d).....320
Figure 7.4.4	Schéma des différentes étapes de la dégradation d'un colis de boues bitumées .....321
Figure 7.4.5	Schéma de la perturbation alcaline des argilites autour des alvéoles de déchets B et de la dégradation du béton de soutènement / revêtement, à 100 000 ans (Jacquot & Dimier, 2005).....325
Figure 7.5.1	Représentation de la perturbation alcaline d'un scellement de galerie autour de la saignée : champ de pH à 20 000 ans (a) et à 500 000 ans (b) (Jacquot & Michau, 2005).....327
Figure 7.9.1	Chronogramme des principaux processus chimiques dans les alvéoles de déchets B, de déchets C et de combustibles usés (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage).....336
Figure 8.2.1	Géométrie de l'EDZ initiale en fonction de l'orientation des ouvrages par rapport à l'état de contrainte naturel .....346
Figure 8.2.2	Exemple de réseau de microfissures connectées obtenu par simulation de l'excavation d'un ouvrage orienté selon $\sigma_H$ avec le code PFC .....353
Figure 8.3.1	Chronogramme de l'évolution mécanique d'une alvéole de déchets B : contextes thermique, hydraulique et chimique en phase de réalisation, phase d'exploitation et phase de postfermeture (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage).....355
Figure 8.3.2	Mise en charge du soutènement/revêtement d'une alvéole de déchets B par le fluage des argilites et évolution de l'EDZ autour de l'alvéole durant la phase d'exploitation.....359
Figure 8.4.1	Mise en charge du soutènement/revêtement d'une alvéole de déchets B exothermiques et évolution de l'EDZ autour de l'alvéole, durant les premiers milliers d'années après fermeture .....364
Figure 8.4.2	Schémas de l'évolution de l'EDZ autour d'une alvéole de déchets B avec la dégradation chimique des bétons (au-delà de 10 000 ans).....366
Figure 8.5.1	Chronogramme de l'évolution mécanique d'une alvéole de déchets C : contextes thermique, hydraulique et chimique en phase de réalisation, phase d'exploitation et phase de postfermeture (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage).....369
Figure 8.5.2	Chronogramme de l'évolution mécanique d'une alvéole de combustibles usés : contextes thermique, hydraulique et chimique en phase de réalisation, phase d'exploitation et phase de postfermeture (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage).....370
Figure 8.5.3	Évolution de l'EDZ autour d'une alvéole de déchets C sous l'effet de l'élévation de la température et de la convergence différée (hypothèse de jeux maximaux) .....372
Figure 8.5.4	Processus de resaturation de l'argile gonflante : exemple du bouchon d'alvéole de déchets C .....374

Figure 8.5.5	Schémas de l'évolution de l'EDZ autour d'une alvéole de déchets C et d'une alvéole de combustibles usés sous l'effet du couplage thermomécanique (échelle de temps de 100 - 150 ans) .....375
Figure 8.5.6	Schémas de l'évolution de l'EDZ autour d'une alvéole de déchets C et d'une alvéole de combustibles usés avant les ruptures du chemisage et du revêtement (échelle de temps pluriséculaire à millénaire) .....378
Figure 8.5.7	Schémas de l'évolution de l'EDZ autour d'une alvéole de déchets C et d'une alvéole de combustibles usés après la rupture du chemisage et avant la rupture du (sur)conteneur (échelle de temps millénaire à décennaire) .....381
Figure 8.5.8	Schémas de l'évolution de l'EDZ autour d'une alvéole de déchets C et d'une alvéole de combustibles usés après la rupture du (sur)conteneur et à long terme (échelle de temps décennaire).....383
Figure 8.6.1	Photographies de la réalisation d'une saignée d'un scellement de galerie et de son remplissage avec des blocs d'argile gonflante compactée : essai de faisabilité au Mont Terri .....385
Figure 8.6.2	Modélisation numérique de la réalisation d'une saignée d'un scellement de galerie : interruption de la zone fracturée le long de la saignée.....386
Figure 8.6.3	Schémas simplifiés illustrant l'interruption de la zone fracturée autour de la saignée d'un scellement de galerie.....387
Figure 8.6.4	Chronogramme de l'évolution mécanique d'un scellement de galerie : contextes thermique, hydraulique et chimique en phase de réalisation et phase de postfermeture (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage).....391
Figure 8.6.5	Modélisation numérique des effets de la pression de gonflement de l'argile gonflante dans la saignée d'un scellement de galerie sur les argilites en champ proche : recompression des fissures de l'EDZ initiale .....392
Figure 8.6.6	Schémas simplifiés illustrant la recompression des fissures de l'EDZ initiale sous l'effet de la pression de gonflement de l'argile gonflante et du fluage et du gonflement des argilites autour d'un scellement de galerie (échelle de temps millénaire) .....393
Figure 8.6.7	Schémas simplifiés illustrant la mise en charge généralisée d'un scellement de galerie au fur et à mesure de la dégradation du revêtement/soutènement en béton (au-delà de 100 000 ans) .....396
Figure 9.3.1	Variations de la température en Antarctique (Vostok) durant les derniers 400 000 ans (d'après Petit et al., 1999) .....409
Figure 9.3.2	Représentation schématique des principales phases climatiques durant un cycle glaciaire-interglaciaire, pour une situation comparable à celle du site de Meuse / Haute-Marne.....410
Figure 9.3.3	Extension des calottes glaciaires et des principaux environnements lors du dernier maximum glaciaire (Berger, 1992).....411
Figure 9.3.4	Simulations du volume des glaces dans l'hémisphère Nord pour les prochains 100 000 ans (d'après Loutre & Berger, 2000) .....412
Figure 9.3.5	Scénarios d'évolution naturelle du climat de la région Meuse / Haute-Marne (d'après BIOCLIM, 2003a).....412
Figure 9.3.6	Évolution climatique selon un scénario avec une forte perturbation anthropique pour le prochain million d'années sur le site de Meuse / Haute-Marne (d'après BIOCLIM, 2003a).....413
Figure 9.4.1	Modèle conceptuel de pergélisol futur sur le site de Meuse / Haute-Marne.....415

Figure 9.4.2	Représentation schématique du stade climatique « boréal » - Végétation et évolution de la biosphère aux alentours du site du laboratoire souterrain .....416
Figure 9.4.3	Représentation schématique du stade climatique « toundra » - Végétation et évolution de la biosphère aux alentours du site .....417
Figure 9.5.1	Variabilité spatiale des vitesses d'érosion moyennes sur le long terme à l'échelle du secteur .....419
Figure 9.5.2	Évolution de la morphologie du secteur de l'actuel jusqu'à un million d'années .....420
Figure 9.6.1	Représentation schématique de l'évolution des écoulements dans l'Oxfordien carbonaté de l'actuel à un million d'années .....423
Figure 9.6.2	Représentation schématique de l'évolution du gradient de charge vertical dans le Callovo-Oxfordien de l'actuel à un million d'années .....424
Figure 9.7.1	Chronogramme des effets des évolutions géodynamiques sur le milieu géologique et l'environnement de surface (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage) .....425
Figure 10.2.1	Chronogramme des processus de dégradation des colis types (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage) .....442
Figure 10.4.1	Répartition de la masse d'iode 129 entre les composants du stockage et la couche du Callovo-Oxfordien, à différents temps, pour la zone de stockage des colis C1-C2. Les pourcentages incluent la masse disparue par décroissance radioactive (réalisé à partir de Andra, 2005m) .....459
Figure 10.4.2	Répartition de la masse d'iode 129 entre les composants du stockage et la couche du Callovo-Oxfordien, à différents temps, pour la zone de stockage de combustibles usés CU1. Les pourcentages incluent la masse disparue par décroissance radioactive (réalisé à partir de Andra, 2005m) .....460
Figure 10.4.3	Répartition de la masse du chlore 36 entre les composants du stockage et la couche du Callovo-Oxfordien à différents temps, pour la zone de stockage des colis C1-C2. Les pourcentages incluent la masse disparue par décroissance radioactive (réalisé à partir de Andra, 2005m) .....460
Figure 10.4.4	Répartition de la masse du chlore 36 entre les composants du stockage et la couche du Callovo-Oxfordien à différents temps, pour la zone de stockage des combustibles usés CU1. Les pourcentages incluent la masse disparue par décroissance radioactive (réalisé à partir de Andra, 2005m) .....461
Figure 10.4.5	Répartition de la masse de sélénium 79 entre les composants du stockage et la couche du Callovo-Oxfordien, à différents temps, pour la zone de stockage des colis C1-C2. Les pourcentages incluent la masse disparue par décroissance radioactive (réalisé à partir de Andra, 2005m) .....461
Figure 10.4.6	Répartition de la masse de sélénium 79 entre les composants du stockage et la couche du Callovo-Oxfordien, à différents temps, pour la zone de stockage des combustibles usés CU1. Les pourcentages incluent la masse disparue par décroissance radioactive (réalisé à partir de Andra, 2005m) .....462
Figure 10.5.1	Organisation des composantes convectives (horizontales et verticales) et diffusives (essentiellement verticales) du transport dans le Callovo-Oxfordien et dans les formations encaissantes (les tailles des flèches sont représentatives de l'intensité des composantes du transport dans les différentes formations) .....466

Figure 10.5.2	Schéma du processus de battement d'un aquifère à l'échelle régionale au cours d'un cycle glaciaire .....467
Figure 10.5.3	Représentation schématique de l'évolution des trajectoires d'un panache de solutés dans l'Oxfordien carbonaté en aval du site de Meuse / Haute-Marne sur le prochain million d'années .....470
Figure 10.6.1	Modèle de transfert des radionucléides sous forme matricielle dans quelques compartiments de la biosphère (IAEA, 2003) .....472
Figure 10.6.2	Principales voies de transfert des radionucléides dans la biosphère .....473
Figure 10.6.3	Modèle de transfert des radionucléides de la géosphère à la biosphère sur le site de Meuse / Haute-Marne .....477

### Tableaux

Tableau 2.3.1	Liste des colis types de déchets vitrifiés du modèle d'inventaire .....50
Tableau 2.3.2	Liste des colis types de déchets B du modèle d'inventaire.....53
Tableau 2.3.3	Liste des assemblages types de combustibles usés du modèle d'inventaire .....54
Tableau 2.3.4	Données quantitatives globales des colis de déchets B, des colis de déchets C, et des assemblages de combustibles usés du modèle d'inventaire suivant les scénarios de production des déchets.....55
Tableau 2.3.5	Débits de dose maximums au contact des différents colis primaires au moment de leur conditionnement dans les colis de stockage.....61
Tableau 2.4.1	Répartition des colis types de déchets B par alvéole .....71
Tableau 2.4.2	Ordres de grandeur des débits de dose au contact des colis de stockage au moment de leur mise en stockage .....74
Tableau 3.3.1	Principales caractéristiques du Callovo-Oxfordien dans son état initial.....143
Tableau 5.6.1	Principales caractéristiques des charges thermiques des différentes zones de stockage (stockage situé à 500 m de profondeur) .....203
Tableau 8.2.1	Evaluations des géométries et des extensions de l'EDZ initiale dans les argilites du Callovo-Oxfordien pour les différents ouvrages du stockage (Barnichon & Su, 2005a) (Barnichon & Su, 2005c) (Su & Barnichon, 2005).....349

# 1

## Introduction

---

<b>1.1</b>	<b>L'objet du Tome dans le dossier 2005 Argile .....</b>	<b>29</b>
<b>1.2</b>	<b>Les données d'entrée .....</b>	<b>30</b>
<b>1.3</b>	<b>La structure du Tome « Evolution Phénoménologique ».....</b>	<b>31</b>
<b>1.4</b>	<b>La représentation des échelles de temps et d'espace des processus.....</b>	<b>32</b>
<b>1.5</b>	<b>La prédiction de l'évolution phénoménologique sur le long terme .....</b>	<b>32</b>



## 1.1 L'objet du Tome dans le dossier 2005 Argile

La loi du 30 décembre 1991 (Loi n°91-1381) a confié à l'Andra la mission d'évaluer la faisabilité d'un stockage de déchets de haute activité et à vie longue (HAVL) en formation géologique profonde. Ce tome du dossier 2005 Argile rend compte des résultats de l'étude, du point de vue de l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique au cours du temps. Il s'appuie sur les caractéristiques de la formation argileuse étudiée au moyen du laboratoire de recherche souterrain, situé dans les départements de la Meuse et de la Haute-Marne.

L'étude de faisabilité s'est attachée à évaluer les conditions dans lesquelles un stockage pourrait être construit, exploité et géré de manière réversible, fermé, surveillé puis pourrait ensuite évoluer sans aucune intervention humaine. Elle couvre l'ensemble de l'inventaire des déchets radioactifs français de haute activité et à vie longue, existants ou à produire dans un avenir à court et moyen termes. Elle vise à ce qu'à aucun moment la sécurité des personnels et du public, ainsi que la protection de l'environnement, ne soient compromises.

Le Tome « Évolution Phénoménologique » se situe au niveau 2 de l'architecture du dossier 2005 Argile au même titre que les tomes « Évaluation de sûreté du stockage géologique » (Andra, 2005j) et « Architecture et gestion du stockage géologique » (Andra, 2005i) avec lesquels il partage des éléments communs sur le cadre géologique et la conception du stockage. Il se positionne en amont du premier et en aval du second (Figure 1.1.1).

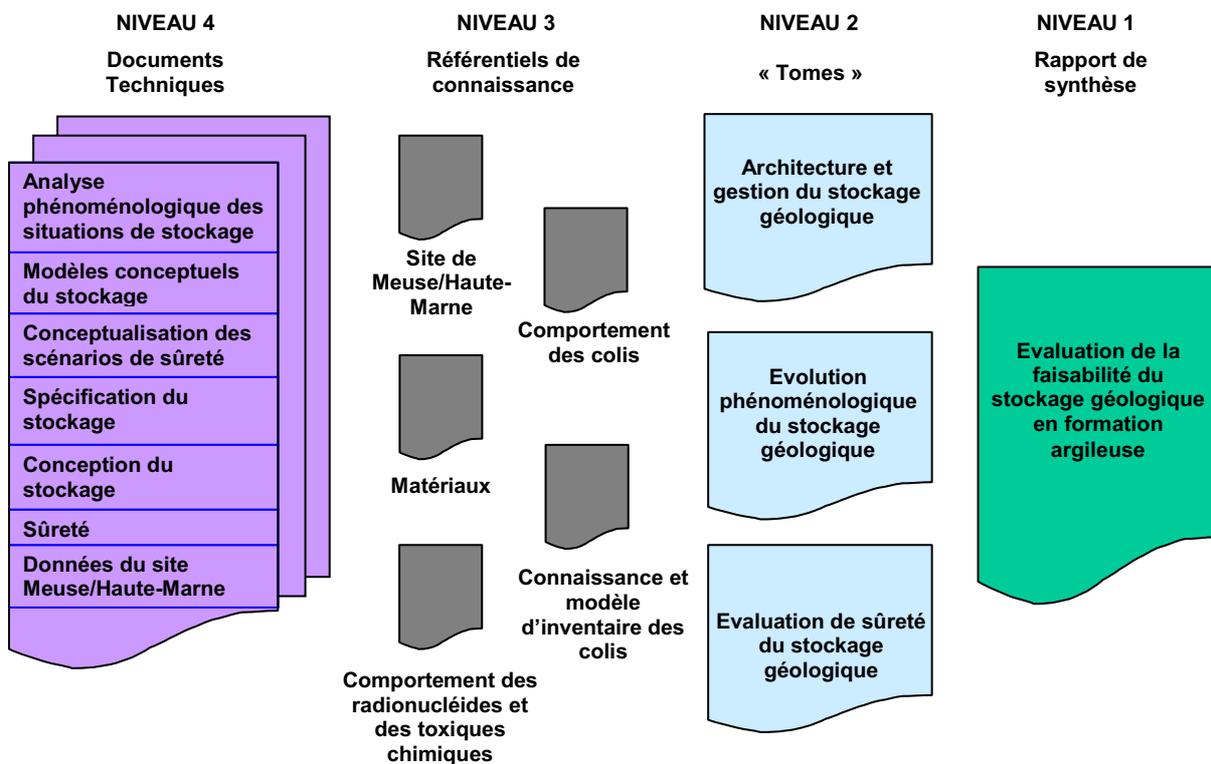


Figure 1.1.1 Structure générale du dossier 2005 Argile

Ce document vise à présenter la synthèse des acquis permettant de décrire l'ensemble des phénomènes et processus pilotant l'évolution du stockage et de son environnement sur une période d'un million d'années. Cette description bénéficie de l'effort de recherche réalisé par l'Andra au cours de ces quinze dernières années et qui a mobilisé un grand nombre de laboratoires et unités de recherche tant en France qu'à l'étranger. Elle repose également sur les travaux conduits en marge de la thématique du stockage de déchets radioactifs en formation géologique, mais permettant soit au travers d'analogies avec les composants naturels et ouvragés du stockage, soit dans le cadre d'approches analytiques, expérimentales ou de modélisations transposables, de fournir des éléments complémentaires à ceux obtenus directement par l'Andra et ses partenaires. Il intègre également les résultats les plus récents obtenus sur le site du laboratoire souterrain tant au travers des sondages réalisés que de la première galerie expérimentale située à -445 m.

## 1.2 Les données d'entrée

Le Tome « Architecture et gestion du stockage géologique » (Andra, 2005i) situé au même niveau que le présent document, fixe la nature et la géométrie des différents composants du stockage ainsi que son architecture générale et ses modalités d'exploitation.

Le Tome « Évolution Phénoménologique » fonde son développement sur un ensemble de documents amont se situant aux niveaux 3 et 4 de l'architecture documentaire du dossier 2005 (Figure 1.1.1) :

- Les référentiels de connaissances situés au niveau 3 de l'architecture du dossier 2005 qui concernent le site (Andra, 2005h), les radionucléides (Andra, 2005g), les modèles de relâchement pour les colis de déchets (Andra, 2005d), le modèle d'inventaire et de dimensionnement des déchets (Andra, 2005e) ainsi que les matériaux du stockage<sup>1</sup> (Andra, 2005f).
- L'Analyse Phénoménologique des Situations de Stockage (APSS) (Andra, 2005a ; Andra, 2005b) qui fournit une description temps-espace des phénomènes affectant les différents composants du stockage et de son environnement. Elle s'appuie sur une description détaillée de ces composants et identifie les processus majeurs et les incertitudes associées.
- Les modèles conceptuels détaillés dans des notes de niveau 4 et construits sur la base des composants (géologiques et ouvragés) ou des processus majeurs identifiés dans l'APSS. Les notes associées à chaque modèle conceptuel rendent compte de la meilleure connaissance disponible, donnent une image de la phénoménologie utilisable pour les calculs de sûreté et déclinent les incertitudes sous forme paramétrique ou sous forme de modèles alternatifs.

Si le présent document bénéficie de l'ensemble de ces composants du dossier 2005, il s'en distingue toutefois par sa structure et son orientation. En particulier, il n'est pas un référentiel de connaissances dans le sens où il ne vise à extraire de ces documents de niveau 3, que les éléments nécessaires à la justification de la présentation qui est faite de l'évolution du stockage. Il vise en revanche à donner une synthèse transversale des résultats scientifiques exprimés dans les référentiels.

Il ne se positionne pas sur le plan de la sûreté du stockage bien que l'évolution du stockage ici décrite soit directement utilisable pour la construction des scénarii de sûreté. Le document apporte également des éléments confortant les choix ou options proposés pour l'architecture du stockage et pour sa gestion réversible. Pour ce faire, il conduit une analyse portant non seulement sur le comportement à long terme, mais également sur les processus intervenant lors de l'exploitation du stockage sur une échelle séculaire prise par convention et pouvant être étendue à une durée pluriséculaire. Il contribue également à l'analyse de sûreté et, en particulier, fournit dans ses conclusions une vision hiérarchisée

---

<sup>1</sup> Les matériaux du stockage désignent l'ensemble des matériaux constitutifs des composants ouvragés du stockage, autres que les déchets ou les colis primaires de déchets. Il s'agit principalement des argiles gonflantes, du béton et des aciers.

des incertitudes qui constitue une donnée d'entrée pour la conduite des calculs de sûreté et des analyses de sensibilité associées.

### 1.3 La structure du Tome « Evolution Phénoménologique »

Comme cela a été précisé auparavant, le présent document s'insère entre le tome présentant l'architecture et la gestion du stockage géologique et celui traitant de l'évaluation de sûreté du stockage géologique. Afin de faciliter la lecture de ces trois documents et d'en assurer la liaison, le tome « Évolution Phénoménologique du stockage géologique » reprend dans le chapitre 2 les éléments essentiels de la conception et de la gestion du stockage nécessaires à la description de l'évolution phénoménologique.

Décrire l'évolution phénoménologique d'un ensemble de composants ouvragés (alvéoles, modules, galeries, puits d'accès, ...) et naturels (couches géologiques hôte et encaissantes) suppose une structuration permettant au lecteur de disposer d'une vision d'ensemble de l'enchaînement des processus régissant l'évolution du stockage. Le tome est donc conçu comme une transposition de l'état des connaissances sous forme d'un récit scientifique se développant sur la durée d'un million d'années retenue pour l'analyse (Andra, 2005j). Compte tenu de la chronologie, de l'enchaînement et du couplage des processus décrits, ce récit ne peut être pleinement linéaire. Il est découpé sur la base d'un chronogramme général d'évolution du stockage par grands phénomènes classés non pas par ordre d'apparition, mais en fonction de leurs implications sur le déroulement des autres phénomènes. Aussi les descriptions des processus relevant de la thermique (T), de l'hydraulique (H), de la chimie (C) et de la mécanique (M) précèdent-ils, dans cet ordre, l'évolution géodynamique, le relâchement et le transfert des radionucléides.

L'ensemble de la description de l'évolution du stockage repose sur une présentation de l'état initial (avant construction et perturbations) qui vise à donner au lecteur les éléments sur les équilibres T-H-C-M<sup>2</sup> caractérisant l'environnement géologique local et régional du site (cf. § 3 sur l'état initial du milieu géologique).

Le choix de traiter successivement les grands phénomènes affectant l'évolution du stockage et de son environnement géologique ne doit pas exclure la nécessité de traiter des couplages. C'est dans cette optique que pour chacun des chapitres dédiés aux processus THCM<sup>2</sup> (cf. § 5, 6, 7 et 8), une introduction et une synthèse assurent le lien avec les chapitres amont et aval respectivement. Les synthèses visent à donner les clés de lecture nécessaires pour aborder le ou les chapitres suivants. Plus spécifiquement, un paragraphe est consacré dans ces synthèses à l'analyse de la réversibilité du stockage (i) en dégagant les grands états phénoménologiques sur la durée séculaire retenue par convention pour la construction, l'exploitation et la fermeture du stockage et (ii) en indiquant les évolutions phénoménologiques liées à la non-fermeture de tout ou partie du stockage durant une échelle de temps pluriséculaire.

Au sein de chaque chapitre, et lorsque cela est nécessaire, la phénoménologie est décrite pour chaque type d'ouvrage ou ensemble d'ouvrages regroupés selon leur géométrie, les matériaux utilisés ou le type d'exploitation associé. Si cette organisation peut conduire à une certaine redondance dans le discours, elle s'avère néanmoins nécessaire pour donner une image précise du comportement de chacun des grands éléments du stockage, et marquer leur indépendance en terme d'évolution phénoménologique.

---

<sup>2</sup> THCM est l'acronyme désignant l'ensemble des phénomènes et processus Thermiques, Hydrauliques, Chimiques et Mécaniques. Les processus Biologiques (activité microbienne) sont inclus dans les processus Chimiques, bien que dans la littérature internationale, ils soient parfois identifiés en tant que tels et désignés sous la lettre B. De même, la lettre R est parfois utilisée pour désigner les processus radiologiques, comme par exemple la radiolyse de l'eau sous l'effet des rayonnements radioactifs. Compte tenu de leurs effets principaux, ils sont inclus dans les processus chimiques.

En fin du document (cf. § 11 et 12) sont rappelés les grands phénomènes ainsi que les incertitudes susceptibles de les affecter. Ceci assure le lien avec le tome « Évaluation de sûreté du stockage géologique » afin de permettre au lecteur de disposer des éléments qui justifient les choix de sûreté ainsi que la conceptualisation des modèles de sûreté et leur traitement.

#### 1.4 La représentation des échelles de temps et d'espace des processus

La perception des extensions spatiales et temporelles des processus THCM et des perturbations associées est indispensable pour la compréhension de l'enchaînement et des couplages éventuels ou non entre les différents processus dans le temps et l'espace. Dans cette optique, des chronogrammes dérivés de ceux présentés dans le document dédié (Chabiron & Plas, 2005) sont insérés dans le texte, avec notamment pour objectif final de positionner le relâchement et la migration des radionucléides et des toxiques chimiques vis-à-vis de chacun des processus.

Les chronogrammes sont volontairement limités à un million d'années, borne choisie pour réaliser les calculs de sûreté sur la base des durées représentatives de la décroissance de la radioactivité et des principaux phénomènes pilotant l'évolution du stockage. Cette borne ne constitue pas en soi une limite au déroulement de processus tels que ceux liés à l'activité géodynamique ou la dégradation de certains composants du stockage, mais correspond plutôt à la définition d'une période enveloppe capable de rendre compte des phénomènes pertinents pour la compréhension de l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique.

Certains éléments temporels ne sont pas pris en compte explicitement comme l'enchaînement des biosphères ou l'analyse en continu des conséquences de l'évolution géodynamique sur le système hydrogéologique. Ils sont néanmoins abordés sous la forme d'une succession d'images fixes prises à des périodes clés et permettant de décrire les transitoires associés.

#### 1.5 La prédiction de l'évolution phénoménologique sur le long terme

La prédiction de l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique sur une échelle de temps du million d'années peut être considérée à première vue comme une gageure. À cet égard, l'échelle de temps séculaire à pluriséculaire de la période d'exploitation, d'observation et de réversibilité du stockage apparaît plus appréhendable à tout un chacun, notamment par le retour d'expérience de comportements d'ouvrages souterrains du génie civil et du génie minier sur plusieurs dizaines d'années.

Le million d'années n'en est pas moins une unité de temps courante dans les sciences de la terre et de l'univers ; les chercheurs de ces domaines scientifiques sont habitués à caractériser, et prédire des processus phénoménologiques parfois complexes, ou leur tendance, sur des échelles de temps bien supérieures au million d'années.

La pertinence de la prédiction de l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique s'inscrit dans ce contexte général. Elle repose sur le principe même du stockage en formation géologique profonde et sur les options de conception proposées pour le stockage.

- Sur le plan régional, la stabilité du milieu géologique acquise depuis plusieurs millions à dizaines de millions d'années n'impose pas de considérer sur la durée de l'analyse des modifications géodynamiques internes significatives. Localement, à l'échelle du secteur d'étude, la couche du Callovo-Oxfordien présente des caractéristiques géométriques et une histoire géologique simples et peu perturbées. Elle est également caractérisée par des échanges de matière très limités avec son environnement et par des interactions entre fluides et roches relevant de processus précoces et datant de plusieurs dizaines de millions d'années *a minima*. Une telle stabilité, combinée à l'homogénéité de la couche et à ses propriétés intrinsèques, confère au système géologique étudié

des caractéristiques accessibles aux moyens scientifiques et techniques disponibles actuellement. Le comportement passé de ce milieu géologique et ses propriétés constituent donc des éléments importants permettant d'asseoir la prédictibilité de son évolution sur le prochain million d'années. En particulier, le choix d'une formation géologique profonde pour l'implantation du stockage permet d'éloigner cette dernière, et par là même le stockage, des évolutions de surface, et de préserver ainsi l'intégrité de ces propriétés dans le temps.

Les caractéristiques géologiques favorables du site de Meuse / Haute-Marne, sont traitées dans le chapitre 3, sur le milieu initial et dans le chapitre 9 sur l'évolution géodynamique du milieu géologique.

- Les options retenues par le concepteur pour le stockage, notamment les architectures et les matériaux, concourent à la maîtrise des processus phénoménologiques mis en jeu dans le temps au sein du stockage et dans le milieu géologique environnant. Ainsi, le choix d'une architecture fractionnée vise à limiter les interactions phénoménologiques au sein du stockage. De même, le choix de matériaux naturels ou assimilés comme tels (bétons, argiles, aciers non ou faiblement alliés, ou verre par exemple) visent également à simplifier les processus phénoménologiques et à conforter la capacité de l'évaluation de leur comportement dans le temps, notamment grâce aux analogues naturels.

Les dispositions de conception du stockage sont présentées dans le chapitre 2, et reprises tout au long des chapitres 5, 6, 7 et 8 décrivant les composantes thermique, hydrologique, chimique, mécanique de l'évolution phénoménologique.



# 2

## **Le site de Meuse / Haute-Marne, les déchets HAVL et les concepts de stockage**

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>37</b>
<b>2.2</b>	<b>Le site de Meuse / Haute-Marne et la couche du Callovo-Oxfordien (Elion, 2005).....</b>	<b>38</b>
<b>2.3</b>	<b>Les déchets HAVL et les combustibles usés (Andra, 2005e).....</b>	<b>42</b>
<b>2.4</b>	<b>Les concepts de stockage (Andra, 2005i) .....</b>	<b>64</b>
<b>2.5</b>	<b>Implications de l'architecture des ouvrages du stockage sur l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique .....</b>	<b>83</b>



## 2.1 Introduction

Les trois principaux éléments qui supportent la description de l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique sont le site de Meuse / Haute-Marne, les déchets et les concepts de stockage. Ils sont exposés successivement dans ce chapitre :

- ✓ Les caractéristiques du site de Meuse / Haute Marne et, particulièrement, la couche du Callovo-Oxfordien retenue pour l'étude de la faisabilité du stockage sont décrites de manière détaillée dans le référentiel de connaissances du site (Andra, 2005h). Elles sont reprises dans le chapitre 3 sur l'état initial du milieu géologique avant la réalisation du stockage, pour en dégager les principaux éléments.
- ✓ À ce stade, et en introduction aux concepts de stockage, on se limite à **(i)** définir la localisation géographique du site et son contexte géologique dans le cadre du Bassin Parisien, et **(ii)** présenter sommairement la couche du Callovo-Oxfordien et les formations géologiques dites « encaissantes » qui encadrent cette couche.
- ✓ De manière similaire, le tome sur l'architecture et la gestion du stockage géologique (Andra, 2005i) traite spécifiquement des déchets HAVL, des combustibles usés et des concepts de stockage. Dans ce chapitre, seules sont abordées les caractéristiques générales des déchets et des concepts de stockage, nécessaires à la compréhension de l'évolution phénoménologique du stockage. Toutefois, dans la suite du document, lors de l'exposé de l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique, des caractéristiques détaillées des déchets HAVL, des combustibles usés et des concepts de stockage pourront être présentées autant que de besoin.

Dans un premier temps, la typologie des déchets HAVL et des combustibles usés est dressée. Les origines des déchets, les colis primaires, les inventaires quantitatifs et radiologiques et les principales caractéristiques physico-chimiques des déchets ou des colis primaires (dégagement thermique,...) sont exposés. Pour ce faire, on indique les différents scénarios de production des déchets retenus, avec leurs hypothèses de base, en particulier celles relatives aux déchets existants non conditionnés et aux déchets futurs.

Dans un deuxième temps, on présente les fonctions de sûreté sur le long terme et la réversibilité du stockage (Andra, 2005j).

Enfin, l'architecture générale du stockage, les colis de stockage, les alvéoles de stockage, et enfin les modalités de gestion et de fermeture du stockage, retenues pour répondre aux fonctions de sûreté et à la réversibilité. En particulier, on s'attache au principe de la conception fractionnée et modulaire du stockage, ainsi qu'au choix des matériaux du stockage et aux critères thermiques retenus pour le dimensionnement du stockage.

- ✓ Une synthèse finale reprend de manière synthétique les grands traits des concepts vis-à-vis de l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique, comme introduction au reste du document. En particulier, on souligne les spécificités en matière de matériaux constitutifs du stockage et les dispositions de conception qui concourent à une simplification et à une maîtrise de cette évolution.

## 2.2 Le site de Meuse / Haute-Marne et la couche du Callovo-Oxfordien (Elion, 2005)

Le site de Meuse / Haute-Marne est défini comme le périmètre d'autorisation de construction du Laboratoire souterrain de recherche. Il est situé dans l'Est de la France, à la limite des départements de la Meuse et de la Haute-Marne (Figure 2.2.1).



Figure 2.2.1 Localisation géographique du site de Meuse / Haute-Marne

Géologiquement, le site de Meuse / Haute-Marne appartient à la bordure orientale du Bassin de Paris (Figure 2.2.2). Dans cette région, le Bassin de Paris est constitué d'une alternance de couches sédimentaires à dominante argileuse et de couches calcaires, déposées dans un environnement marin stable au cours du Jurassique entre -165 millions et -135 millions d'années (cf. § 3). Ces couches présentent une structure à géométrie simple et régulière avec un léger pendage vers le nord-ouest, de 1,5 à 2°, en accord avec la structure générale du Bassin de Paris en forme d'une cuvette dont le centre est l'Île de France.



Figure 2.2.2 Localisation géologique du site de Meuse / Haute-Marne au sein du Bassin Parisien

Au sein de la série sédimentaire, le Callovo-Oxfordien est la formation retenue pour l'étude de la faisabilité du stockage (Figure 2.2.3). Elle est encadrée par deux formations géologiques, le Dogger sous-jacent et l'Oxfordien carbonaté sus-jacent, au sein desquelles se trouvent des horizons sédimentaires aquifères présentant néanmoins de faibles perméabilités et des écoulements lents de l'ordre du kilomètre par centaine de milliers d'années.

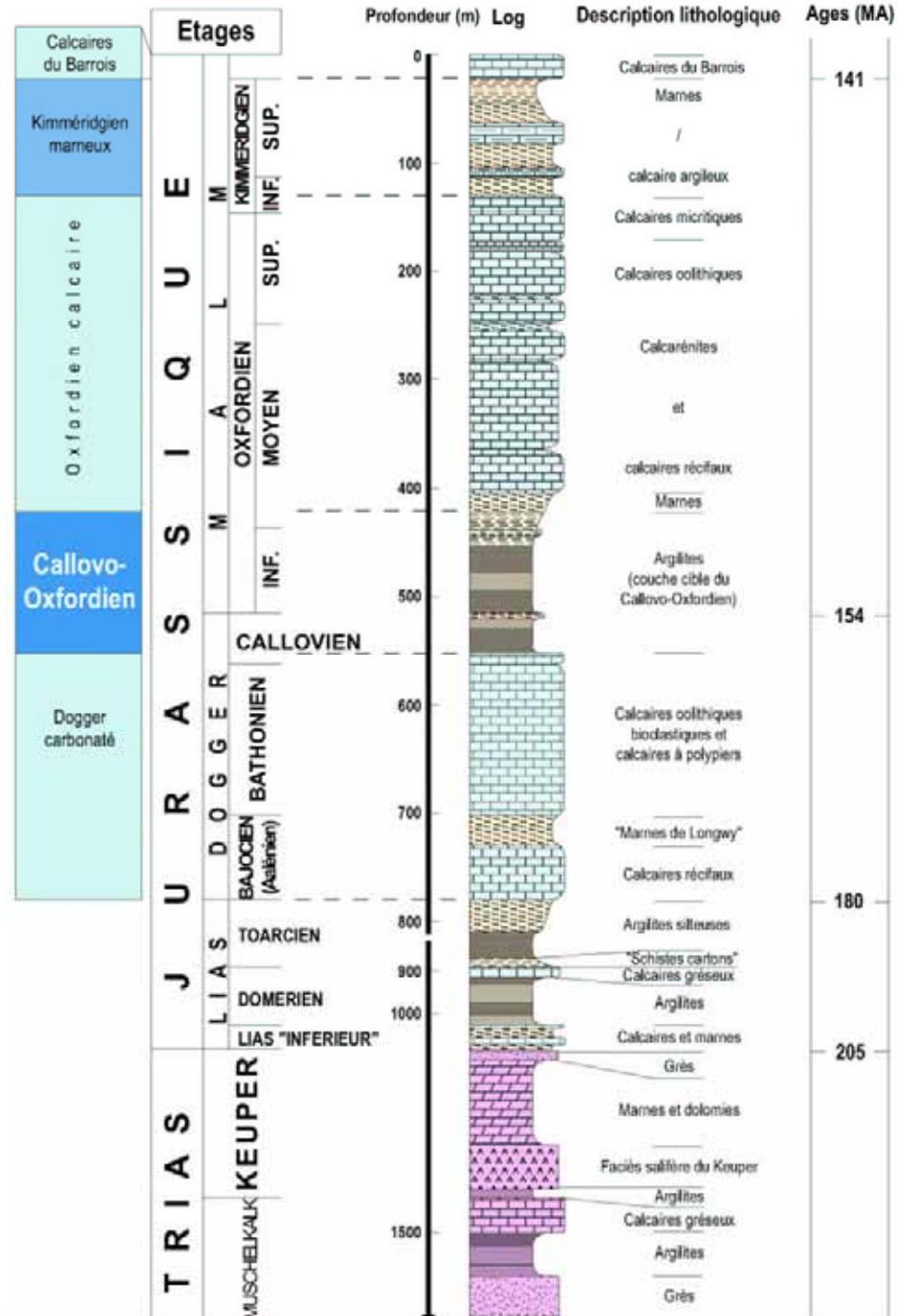


Figure 2.2.3 Coupe géologique au niveau du site de Meuse / Haute-Marne

Le cadre structural est stable, avec une orientation des contraintes mécaniques naturelles stable depuis 20 millions d'années. Le site se situe à l'écart des grandes failles régionales, comme le fossé de la Marne au Sud-Ouest (Figure 2.2.4).

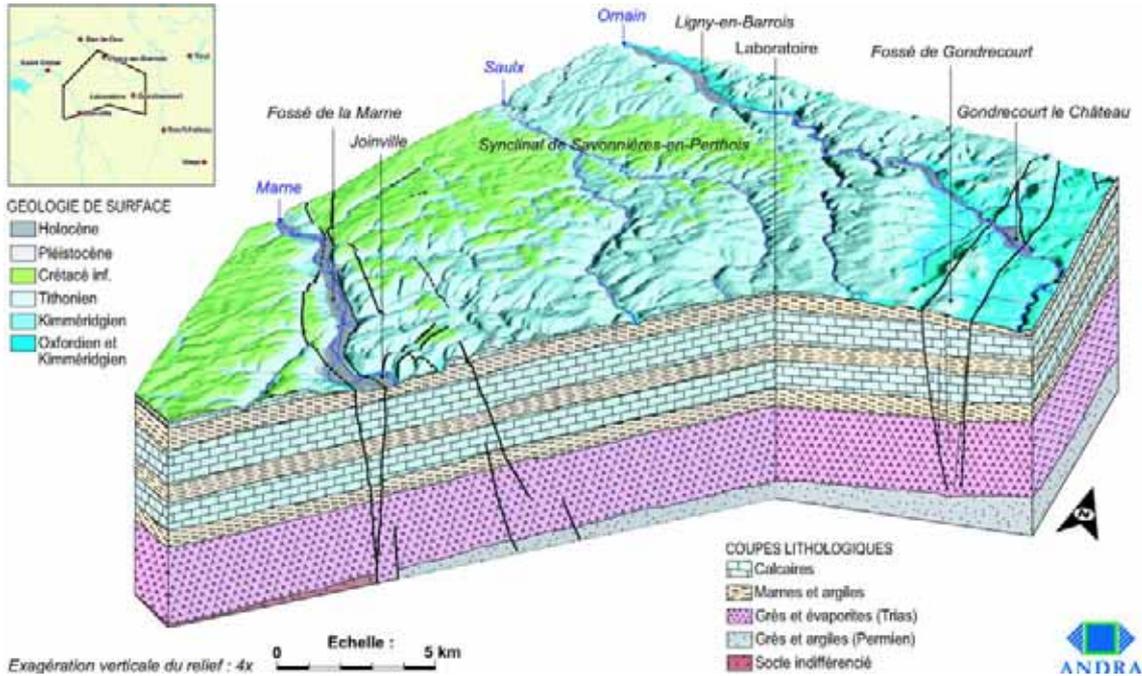


Figure 2.2.4 Bloc diagramme géologique 3D du site de Meuse / Haute-Marne

Sur le plan sismo-tectonique, le Bassin de Paris est une zone stable à très faible sismicité à l'écart des zones actives comme le fossé Rhénan à l'Est, les Alpes au Sud-est, le Massif Central au Sud et le Massif Armoricain à l'Ouest. Sur le secteur de Meuse / Haute-Marne, il n'y a pas d'activité néotectonique détectable et pas d'activité sismique locale significative comme l'indiquent le réseau d'écoute sismique national et celui mis en place par l'Andra. L'aléa sismique maximal physiquement possible est estimé de magnitude  $6,1 \pm 0,4$  (avec un épocentre à 6 km du site).

Le Callovo-Oxfordien se présente comme une couche argileuse épaisse (au moins 130 mètres), homogène latéralement, à faible porosité (15 %), peu perméable (vitesse de Darcy de l'eau de l'ordre de 3 centimètres en 100 000 ans), constituée de phases minérales argileuses (smectites, illites et inter stratifiés illite / smectite) représentant jusqu'à 60 % de sa masse, ainsi que de silts (quartz fins) et de carbonates, d'où son nom d'argilites. La sismique 3D réalisée par l'Andra ne révèle pas de faille de rejet vertical supérieur à 2 mètres au sein de la couche. Des forages déviés confirment l'absence de faille secondaire (subsismique...); en outre, sur plus de 4 km de carottes, seules ont été observées quelques micro cassures sans mouvement, sans effet sur l'écoulement de l'eau et dont certaines sont colmatées par des sulfates (Célestine), ce qui souligne leur formation précoce au moment de la compaction des dépôts.

Les caractéristiques du Callovo-Oxfordien ont été acquises peu après le dépôt; la couche n'a pas été perturbée après sa mise en place, comme le soulignent les marqueurs isotopiques Sr et  $\delta^{13}\text{C}$ , des thermomètres géologiques indiquant une paléo température maximale de l'ordre de 40 °C et la quasi-absence de minéraux formés plus tardivement (au-delà de 10 millions d'années).

La composition minéralogique argileuse des argilites confère à la couche du Callovo-Oxfordien des capacités de rétention élevées. À cela s'ajoutent de faibles valeurs des coefficients de diffusion, notamment pour les anions, du fait de la structure porale très petite des argilites. La moitié de la porosité de 15 % à 18 % est occupée par de l'eau liée; les pores ont une taille moyenne de 50 nm correspondant à un faible empilement de quelques molécules d'eau. Une répulsion électrostatique des anions existe au niveau des pores les plus petits, du fait de l'existence de charges négatives à la surface des minéraux argileux. La rétention des cations est de fait élevée. Les profils de traceurs naturels ( $^{37}\text{Cl}$ ,  $^{11}\text{B}$ ,  $^4\text{He}$ ) ainsi que les contrastes de concentration en chlorures entre la base de l'Oxfordien carbonaté et le toit du Callovo-Oxfordien confirment des processus de transport lents des solutés.

Enfin, les argilites présentent des propriétés mécaniques favorables à la faisabilité d'ouvrages souterrains aux profondeurs de la couche du Callovo-Oxfordien sur la zone de transposition (résistance à la compression simple supérieure à 21 MPa) et des propriétés thermiques significatives (conductivité thermique comprise entre 1,4 et 2,7 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> suivant la stratigraphie).

À partir de la position du laboratoire de recherche souterrain, on définit une zone dite « de transposition » au sein de laquelle la couche du Callovo-Oxfordien présente des propriétés physiques et chimiques similaires à celles observées au niveau du laboratoire souterrain de recherche (Figure 2.2.5). Sa superficie est d'environ 250 km<sup>2</sup>. La profondeur du toit et l'épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien varient respectivement de 420 mètres au niveau du laboratoire de recherche souterrain à plus de 600 mètres suivant la direction du pendage, et de 130 m au niveau du laboratoire de recherche à 160 m vers le nord.

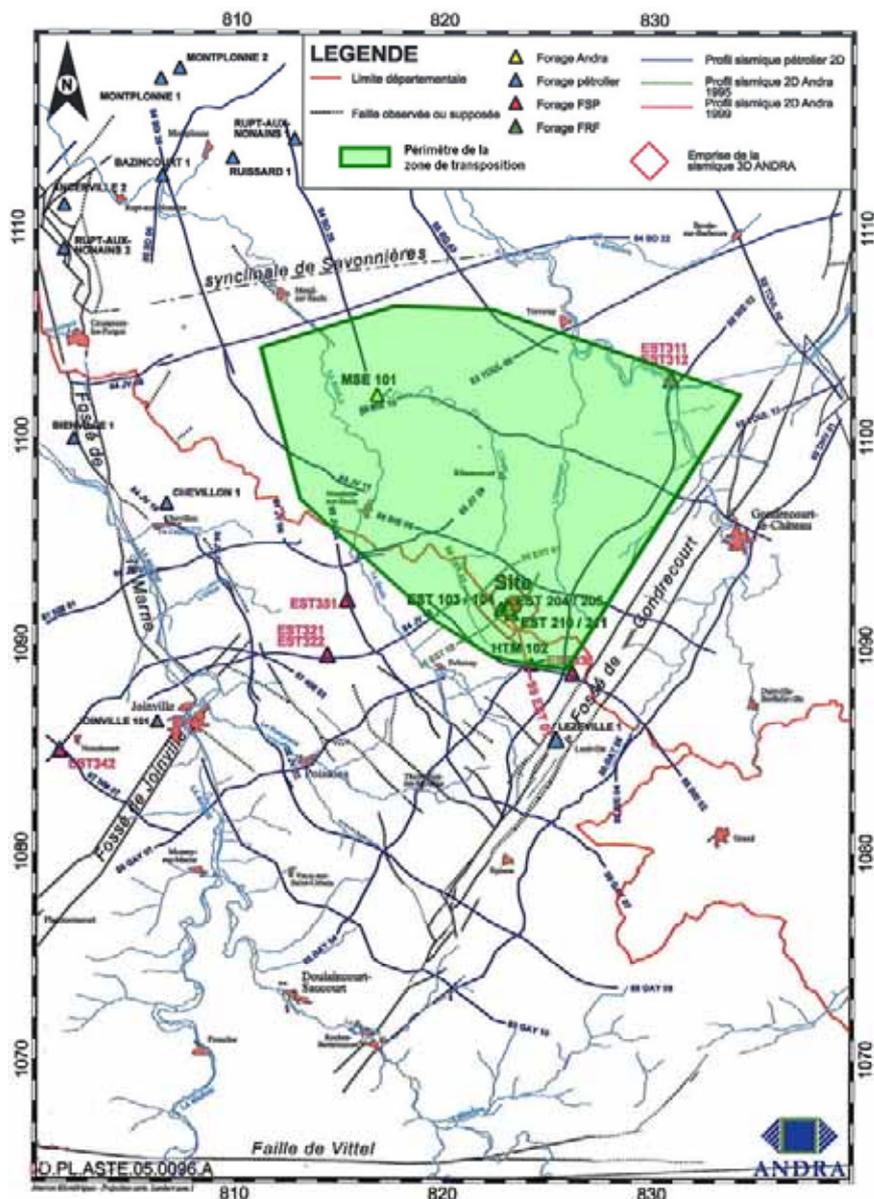


Figure 2.2.5 Localisation de la zone de transposition autour du site de Meuse / Haute-Marne et position des forages réalisés par l'Andra sur le secteur

## 2.3 Les déchets HAVL et les combustibles usés (Andra, 2005e)

Les déchets HAVL résultent de l'industrie électronucléaire (EDF et COGEMA), ainsi que des activités de recherche et de la défense nationale (CEA). Ces déchets proviennent aujourd'hui essentiellement des combustibles usés déchargés des réacteurs de production d'électricité d'EDF, puis retraités dans les usines de COGEMA La Hague pour séparer l'uranium et le plutonium. Ils contiennent des radioéléments à vie courte, généralement en quantité importante (haute activité) et des radioéléments à vie longue en quantité moyennement à très importante ; il s'agit d'actinides, de produits de fission et de produits d'activation (Encadré 2.1).

Les combustibles usés sont considérés comme des matières nucléaires valorisables et, à ce titre, pas comme des déchets. Néanmoins, ils sont également considérés pour l'étude de la faisabilité du stockage, afin de couvrir l'ensemble des possibles sans préjuger du schéma futur de l'industrie électronucléaire.

L'inventaire des déchets et des colis de déchets (en nature et en quantité) prend en compte l'ensemble des déchets déjà produits et ceux qui pourront l'être par l'exploitation des installations nucléaires existantes. Cela implique, pour ce qui concerne les productions futures, de formuler des hypothèses de production et de conditionnement de déchets, en particulier en matière de gestion du parc électronucléaire.

### *Encadré 2.1 Les éléments radioactifs dans les assemblages de combustibles usés formés en réacteurs*

Les éléments radioactifs formés en réacteur par les réactions de fission sont de trois types :

- ✓ Les **actinides**. Ces noyaux de numéro atomique plus élevé que celui de l'uranium, sont créés par des captures de neutrons qui n'ont pas été suivies de fissions. Les actinides tirent leur nom de l'actinium ( $Z=89$ ), un métal lourd qui précède l'uranium dans la table de Mendeleïev, mais possèdent des propriétés chimiques voisines. L'uranium, qui existe à l'état naturel, est aussi un actinide.

L'actinide produit le plus abondamment en réacteur est le plutonium, avec en-tête, son principal isotope le plutonium-239 ( $^{239}\text{Pu}$ ), lui-même fissile. Les réacteurs produisent en quantité moindre, d'autres actinides qui sont appelés « mineurs » pour cette raison. Les principaux sont le neptunium-237 ( $^{237}\text{Np}$ ), les américium-241 et 243 ( $^{241}\text{Am}$  et  $^{243}\text{Am}$ ) et les curium-244 et 245 ( $^{244}\text{Cm}$  et  $^{245}\text{Cm}$ ). Toutefois, la production d'actinides mineurs est faible par rapport à celle des produits de fission et du plutonium.

- ✓ Les **produits de fission**. Ils sont issus soit, directement de la fission des noyaux lourds, comme  $^{235}\text{U}$ , soit de la désintégration des fragments de fission. Il s'agit par exemple de  $^{129}\text{I}$ .

Les produits de fission appartiennent à un grand nombre d'espèces chimiques. La plupart se fixent dans le combustible sous forme d'oxydes solides. Certains sont des métaux qui restent en place, d'autres sont des gaz rares comme le  $^{85}\text{Kr}$ .

- ✓ Les **produits d'activation**. Ils sont formés principalement dans les différents alliages de structure des assemblages par leur bombardement par les neutrons ou d'autres particules.

Certains produits de fission et produits d'activation sont gazeux ou extrêmement volatils comme  $^3\text{H}$  et  $^{85}\text{Kr}$  en totalité, ou  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{14}\text{C}$ , et  $^{129}\text{I}$  pour une partie de leur inventaire. Ils sont localisés dans (i) les volumes libres des crayons comme les jeux entre les pastilles et les gaines ou la partie haute des crayons après avoir diffusé hors des grains et des pastilles en réacteur, (ii) les joints de grains, (iii) les fissures/fractures des pastilles, (iv) les grains sous forme d'inclusions, et (v) les pores des zones restructurées des pastilles comme le RIM.

On notera que certains éléments radioactifs peuvent être à la fois un produit de fission et un produit d'activation, comme  $^{14}\text{C}$  par exemple.

Transportés dans les usines de retraitement, les assemblages de combustibles usés sont démantelés. Les crayons de combustibles usés sont cisailés, et dissous dans l'acide nitrique. Le plutonium et l'uranium sont extraits de cette solution par des méthodes chimiques. L'uranium récupéré est à nouveau enrichi pour former du combustible. Quant au plutonium, il sert à la fabrication de nouveaux combustibles composés d'un mélange d'oxyde d'uranium et d'oxyde de plutonium, le "MOX" (de l'anglais "mixed oxides"), déjà utilisé dans un tiers des réacteurs à eau pressurisée (REP) français. Les solutions résidus du traitement chimique à l'acide nitrique contiennent principalement des produits de fission et des produits d'activation ; elles sont calcinées et vitrifiées pour constituer les colis primaires de déchets vitrifiés. Les éléments de structure des assemblages de combustibles usés contiennent principalement des produits d'activation ; conditionnés dans du béton ou compactés, puis mis en fût inox, ils constituent des colis primaires de déchets B.

### 2.3.1 Les grandes catégories de déchets HAVL

Les déchets à Haute Activité et/ou à Vie Longue comprennent deux grandes catégories :

#### 2.3.1.1 Les déchets C (appelés aussi déchets vitrifiés ou déchets HA pour Haute Activité)

Ils correspondent aux matières non valorisables contenues dans les solutions de haute activité issues du retraitement des combustibles usés dans les usines de COGEMA La Hague et COGEMA Marcoule. Ces solutions sont un mélange de produits de fission, d'actinides et de produits d'activation. Elles sont évaporées et les matières solides obtenues, contenant la radioactivité, sont calcinées et dissoutes à haute température dans une matrice en verre borosilicaté. L'ensemble est ensuite coulé dans des fûts en acier inoxydable 316L pour constituer les colis dits « primaires » de déchets vitrifiés (Figure 2.3.1).

À l'issue de la coulée du verre, les éléments radioactifs sont répartis de manière homogène au sein de la matrice vitreuse et sous des formes chimiques diverses, comme une incorporation dans le réseau vitreux ou des inclusions métalliques.



Figure 2.3.1 Schéma d'un colis primaire de déchets C vitrifiés avec écorché et photographie montrant la matrice vitreuse

### 2.3.1.2 Les déchets B (appelés aussi déchets MAVL<sup>3</sup>)

Ce sont principalement des déchets de moyenne activité et à vie longue issus du retraitement des combustibles usés, de l'exploitation, de la maintenance courante et des opérations d'entretien des usines de retraitement ou du parc électronucléaire. Il s'y ajoute des déchets issus des centres d'études nucléaires du CEA.

Les déchets B sont de natures très diverses. Il s'agit des éléments de structure métallique des assemblages de combustibles (gainés en zircaloy des crayons de combustibles, grilles de maintien des assemblages,...) dits « *déchets de structure* », des *boues de traitement des effluents* de moyenne activité principalement formées de sels de co-précipitation et des *déchets technologiques* comme des filtres ou des pompes. Les métaux représentent une part importante des déchets B, mais on y trouve aussi des composés organiques et inorganiques (bitumes, plastiques, cellulose,...).

Les déchets B contiennent des actinides, mais du fait de leur origine, on retrouve, dans la plupart d'entre eux, des produits d'activation et des produits de fission. Les radionucléides sont majoritairement répartis de manière homogène au sein des déchets ; une fraction seulement est localisée en surface des déchets ; c'est par exemple le cas des produits de fission comme <sup>129</sup>I, implantés dans les premiers micromètres de la face interne des gainés de zircaloy.

Suivant leur nature, les déchets B sont conditionnés selon trois modes :

- le bitumage, par exemple pour les boues issues du traitement des effluents,
- le bétonnage,
- le compactage, par exemple pour les coques et embouts et les déchets technologiques.

Les déchets conditionnés sont mis en place dans des fûts en béton ou en acier. Les colis obtenus forment les colis dits primaires de déchets B (Figure 2.3.2).

---

3 MAVL : acronyme de « Moyenne Activité et à Vie Longue »

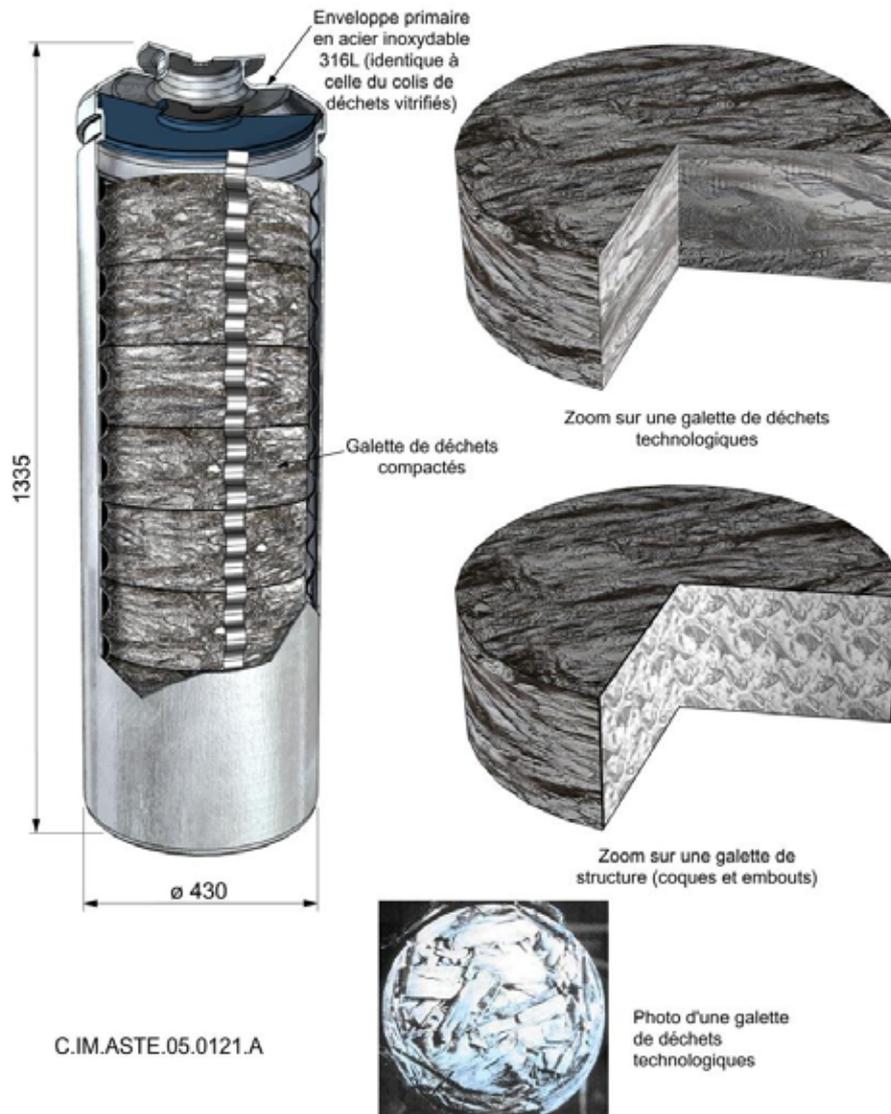


Figure 2.3.2 Schéma d'un colis B de coques et embouts et de déchets technologiques compactés (colis type B5, cf. Tableau 2.3.2)

### 2.3.2 Les combustibles usés (notés CU) après leur passage en réacteurs REP d'EDF ou en réacteurs expérimentaux du CEA

Un assemblage de combustible nucléaire comprend un faisceau de crayons constitués d'une gaine en alliage zircaloy, contenant les pastilles de combustible d'oxyde d'uranium  $UO_2$ , dit « UOX », ou d'oxyde mixte uranium et plutonium  $(U-Pu)O_2$ , dit « MOX ». Ces pastilles sont formées par frittage des grains d'oxyde. Les crayons, dont la longueur est de l'ordre de 4 mètres, sont fermés en parties haute et basse par 2 bouchons soudés. L'empilement de pastilles d'un crayon, représentant environ 95 % de la longueur d'un crayon, est mécaniquement stabilisé par un ressort hélicoïdal en inconel en partie haute du crayon.

Une série de grilles métalliques assure le maintien mécanique du faisceau de crayons d'un assemblage. En partie haute de l'assemblage, un dispositif constitué par la plaque de tête métallique et de « l'araignée » permet la manutention de l'assemblage ainsi que le passage des crayons de commande en réacteur. La Figure 2.3.3 présente le schéma d'un assemblage de combustibles REP EDF.

L'ensemble des éléments métalliques d'un assemblage constitue ce que l'on appelle les éléments de structure.

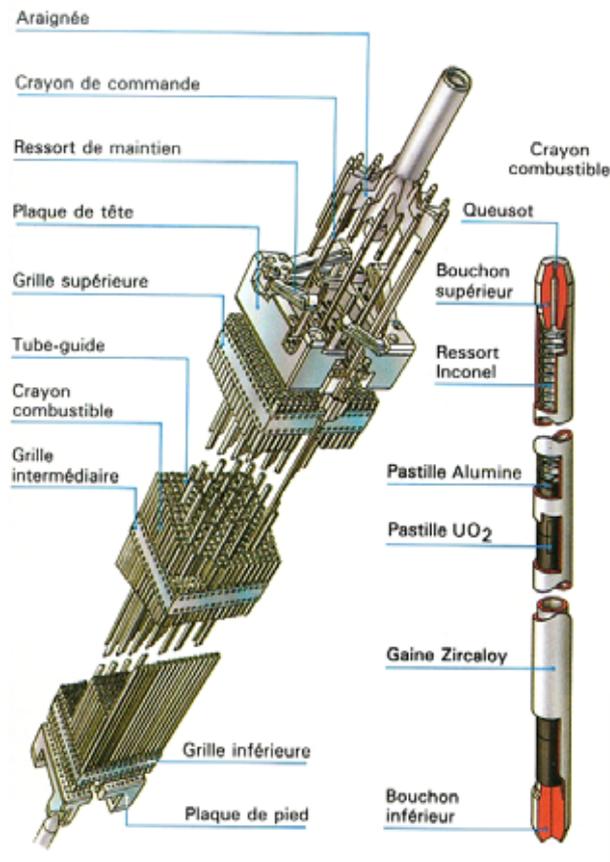


Figure 2.3.3 Schéma d'un assemblage de combustible REP

En réacteur, les assemblages subissent des modifications physico-chimiques importantes par rapport à leur état initial. En particulier, les pastilles présentent des fissures et des différences de taille de grains liées à des processus de recristallisation. Une couche de zirconium oxydé, la zircone, de quelques micromètres d'épaisseur s'est formée sur les faces interne et externe des gaines en zircaloy.

Les réactions de fission de l'uranium et du plutonium en réacteur ont entraîné la formation d'actinides, de produits de fission et de produits d'activation. Ces radionucléides sont localisés au sein des pastilles d'oxyde et des éléments de structure. Les actinides sont essentiellement répartis dans les pastilles d'oxyde et, plus précisément, dans les grains d'oxydes. Certains produits de fission et d'activation formés dans les pastilles, comme le  $^{14}\text{C}$ , sont volatils (ou gazeux) dans les conditions de température et de pression en réacteur. Ils peuvent alors avoir migré partiellement en dehors des grains d'oxydes, et s'être accumulés dans les jeux, notamment en partie supérieure des crayons (Figure 2.3.3), dans les joints de grains et les fissures, comme schématisé sur les Figure 2.3.4 et Figure 2.3.5. Les éléments de structure contiennent essentiellement des produits d'activation, comme  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{93}\text{Zr}$  et  $^{94}\text{Nb}$ , localisés par nature dans la masse des éléments de structure. Plus spécifiquement, les gaines contiennent de  $^{129}\text{I}$  implanté par recul dans la couche de zircone lors des réactions de fission.

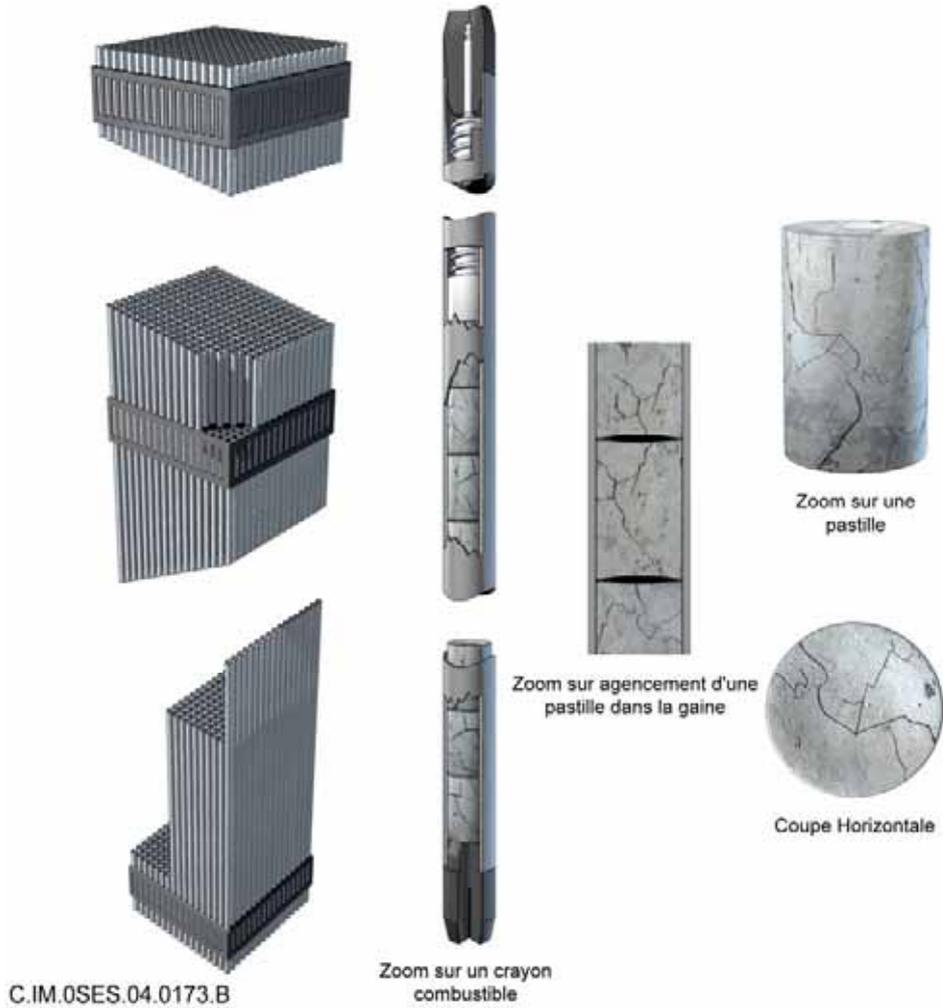


Figure 2.3.4 Schéma d'un assemblage de combustibles usés avec écorché et coupes d'un crayon de combustibles usés, après passage en réacteur

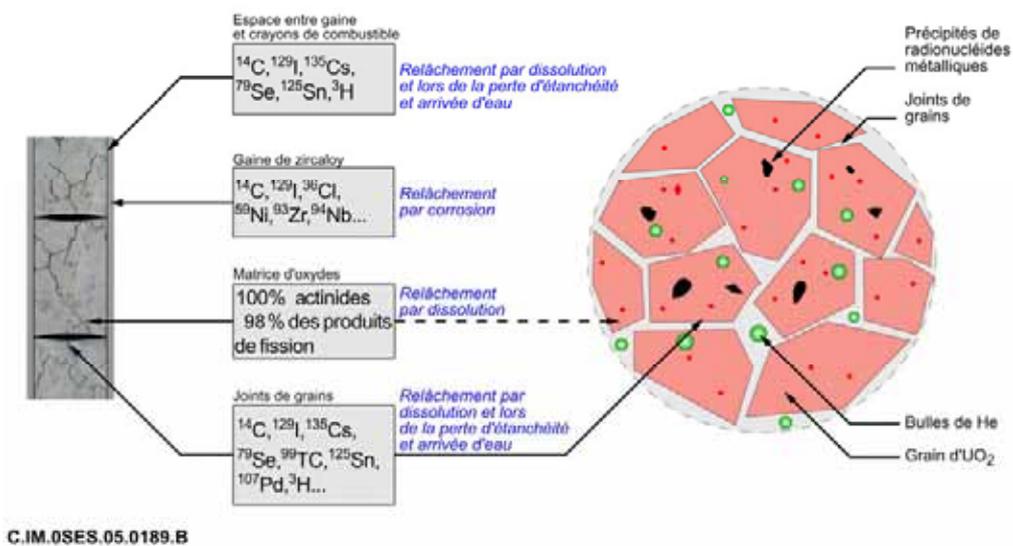


Figure 2.3.5 Schéma de principe de la localisation des radionucléides au sein d'un crayon de combustibles usés et d'une pastille d'oxyde type UOX, après passage en réacteur

### 2.3.3 Les scénarios d'étude de la production des déchets

Le parc actuel de réacteurs électrogènes à eau pressurisée se compose de 58 réacteurs, dont la mise en service s'est effectuée entre 1977 et 1999. Le tonnage de combustibles nucléaires qui serait déchargé de ces réacteurs sur la totalité de leur durée d'exploitation est estimé à 45 000 tonnes de « métal lourd » (tML). Cette estimation se fonde sur une combinaison d'hypothèses portant sur **(i)** la durée de vie moyenne des tranches (quarante années), **(ii)** la production d'énergie (16 000 terawatts-heures de production cumulée), **(iii)** la montée progressive des taux de « combustion » des combustibles en réacteurs.

Sur cette base, quatre scénarios de gestion des combustibles nucléaires sont retenus pour mener les études sur le stockage. Le principe de ces scénarios consiste à encadrer différentes stratégies industrielles possibles, sans chercher à privilégier l'une ou l'autre d'entre elles. Cette démarche donne accès à une très large gamme de types de déchets et permet une instruction technique des questions associées aux divers colis (Andra, 2005e).

- ✓ Les trois premiers scénarios de gestion correspondent à la poursuite du traitement des combustibles usés déchargés des réacteurs :
  - le retraitement complet des combustibles usés UOX et MOX des réacteurs EDF avec production de l'ensemble de la typologie des colis types de déchets vitrifiés (scénario de gestion noté **S1a**),
  - le retraitement des combustibles UOX associé à la production de déchets vitrifiés C1 et C2 (scénario de gestion noté **S1b**),
  - le retraitement des combustibles UOX associé à la seule production de déchets vitrifiés C1 (scénario de gestion noté **S1c**).

Les scénarios S1b et S1c sont distingués pour étudier, dans le scénario S1b, la possibilité d'augmenter la concentration de déchets dans les verres, par rapport aux colis produits actuellement. Cette plus grande concentration se traduirait par un dégagement thermique des colis légèrement supérieur (cf. § 5).

- ✓ Le quatrième scénario de gestion, noté **S2**, suppose la poursuite du retraitement des UOX jusqu'en 2010, puis l'arrêt de ce traitement. Il supporte l'étude exploratoire d'un stockage direct de combustibles UOX et URE, ainsi que celui de combustibles MOX comme dans les scénarios S1b et S1c.

Afin de traduire ces scénarios de gestion en terme de déchets conditionnés, les hypothèses adoptées pour les déchets existants non conditionnés et les déchets futurs consistent à reconduire les procédés industriels actuellement mis en œuvre par les producteurs de déchets : vitrification, compactage, cimentation, bitumage.

### 2.3.4 Les colis types de déchets primaires

Les deux grandes catégories de déchets HAVL et les combustibles usés regroupent une typologie variée de familles qui se différencient par leur origine, leur composition chimique, leur inventaire en radionucléides, leur nombre, leur conditionnement ou leurs comportements physique et chimique (cf. § 2.4.2.6).

Afin de simplifier la conception du stockage, les familles sont regroupées en colis types, suivant une classification à trois niveaux, qui constitue le modèle d'inventaire de dimensionnement (MID) (Andra, 2005e). Le niveau 1 correspond principalement à la composition et au mode de conditionnement. Les niveaux 2 et 3 rendent compte de la diversité des familles au sein d'un même colis type de niveau 1, notamment vis-à-vis de leur comportement phénoménologique dans le stockage.

### 2.3.4.1 Les colis types de déchets C

Les déchets C sont regroupés en cinq colis types de niveau 1 en fonction de leurs origines et de leurs dégagements de chaleur en relation avec leurs contenus en radioéléments (Tableau 2.3.1).

Les colis de déchets vitrifiés C0 correspondent à des productions anciennes. On distingue trois sous-ensembles (niveau 2) correspondant respectivement au traitement :

- (i) de combustibles usés de réacteurs Uranium Naturel-Graphite-Gaz (combustibles UNGG de type Sicral) et de combustibles issus du réacteur à neutrons rapides Phénix, dans l'installation PIVER à Marcoule entre 1969 et 1981 (déchets vitrifiés dits PIVER),
- (ii) de combustibles UNGG traités antérieurement sur le site de COGEMA La Hague, aujourd'hui entreposés en attente de conditionnement (déchets vitrifiés dits UMo),
- (iii) de combustibles UNGG depuis 1978 dans l'atelier de vitrification de COGEMA Marcoule (déchets vitrifiés dits AVM). Les colis primaires C0 diffèrent particulièrement des autres colis types de déchets vitrifiés par leurs dimensions.

Les colis types C1 à C4 correspondent à deux groupes :

- Les **déchets vitrifiés issus de productions actuelles ou envisagées à court terme** du fait du traitement de combustibles REP UOX/URE dans les usines de COGEMA La Hague.

Ils comprennent les colis types C1 correspondant au traitement actuel des combustibles UOX1 (taux de combustion en réacteur de 33 GWj.t<sup>-1</sup>), UOX2/URE (taux de combustion en réacteur de 45 GWj.t<sup>-1</sup>) et UOX3 (taux de combustion en réacteur de 55 GWj.t<sup>-1</sup>) et les colis types C2 correspondant au traitement des combustibles UOX2/URE (taux de combustion en réacteur de 45 GWj.t<sup>-1</sup>) et UOX3 (taux de combustion en réacteur de 55 GWj.t<sup>-1</sup>).

- Les **déchets vitrifiés futurs hypothétiques**. Ils correspondent à des productions éventuellement envisageables de verres sur le site de COGEMA La Hague.

*Un premier sous-ensemble de colis (C3) décrit des verres résultant du conditionnement de solutions de produits de fission issues de combustibles UOX et MOX. Ces verres sont définis comme étant constitués d'un mélange de 15 % de MOX et de 85 % d'UOX2.*

*Un deuxième sous-ensemble de colis (C4) décrit des déchets vitrifiés issus du traitement de combustibles UOX contenant une faible charge supplémentaire en plutonium. Le taux d'incorporation du plutonium dans le verre est fixé à un pour cent massique, soit environ 4 kilogrammes par colis. Le plutonium incorporé provient de combustibles UOX2.*

Les différents colis types sont représentés sur le schéma de la Figure 2.3.6.

Tableau 2.3.1 Liste des colis types de déchets vitrifiés du modèle d'inventaire

Colis types	Niveau 1	Niveau 2	Intitulés	Remarques
Déchets vitrifiés	C0	C0.1	Déchets vitrifiés PIVER	Colis types issus de productions anciennes
		C0.2	Déchets vitrifiés UMo	
		C0.3	Déchets vitrifiés AVM	
	C1		Déchets vitrifiés UOX/URE "thermique actuelle"	Colis types issus de productions actuelles ou envisagées à court terme (conditionnement en colis Standard de déchets vitrifiés CSD-V : fût inox 316L)
	C2		Déchets vitrifiés UOX/URE "thermique future"	
	C3		Déchets vitrifiés UOX/MOX	Colis types futurs hypothétiques
C4		Déchets vitrifiés UOX + Pu	(conditionnement similaire à celui des C1 et C2)	

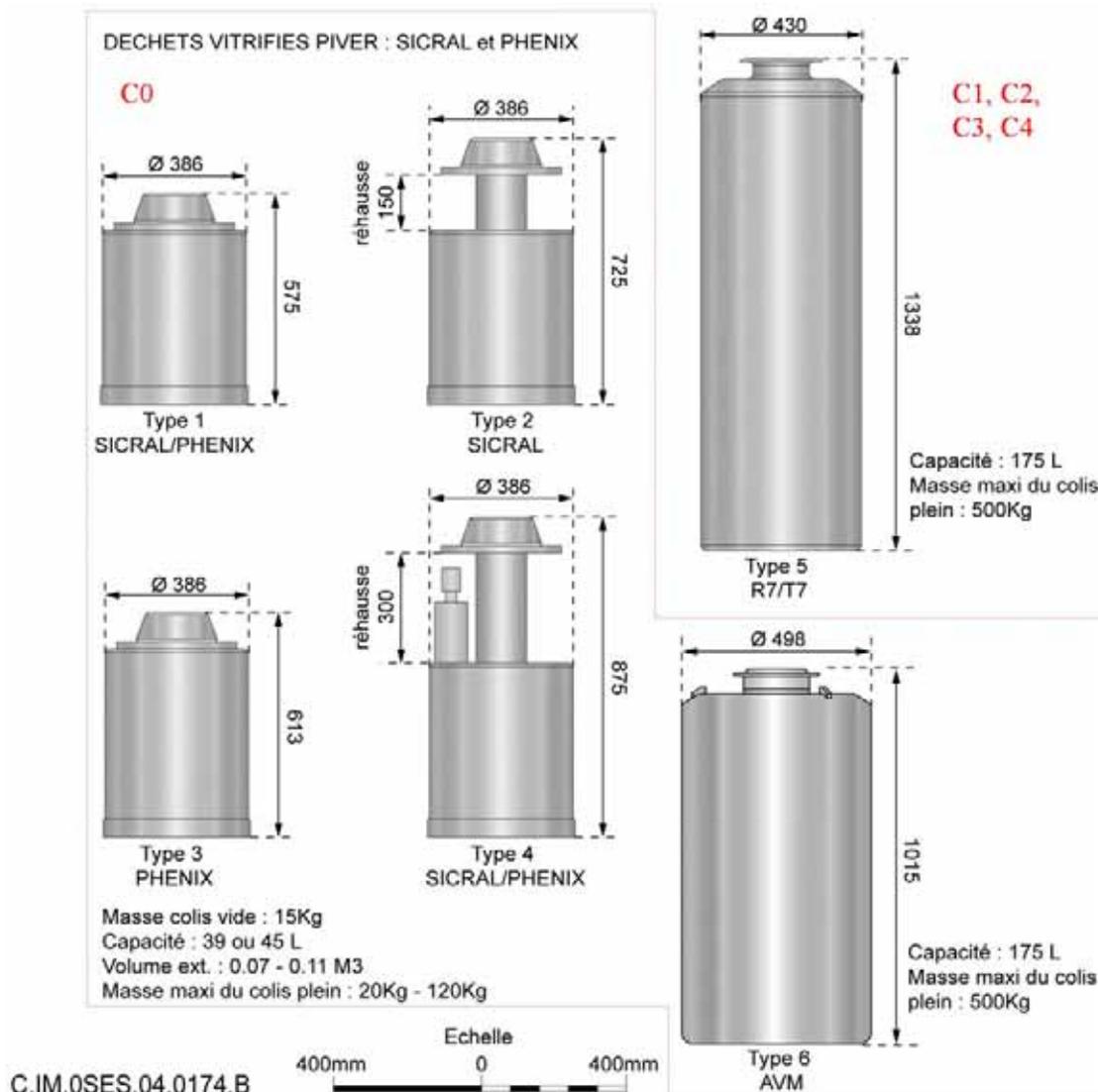


Figure 2.3.6 Schéma et dimensions des colis types de déchets vitrifiés

### 2.3.4.2 Les colis types de déchets B

De par leur typologie diversifiée, les déchets B sont regroupés en 8 colis types de niveau 1 pour rendre compte essentiellement de leurs natures et de leurs modes de conditionnement (bitumage, compactage ou cimentation) (Tableau 2.3.3). Il s'agit des déchets métalliques activés des réacteurs nucléaires (B1), des boues de traitement d'effluents liquides bitumées (B2), déchets technologiques cimentés ou compactés (B3), des déchets de structure cimentés (B4) ou compactés (B5), des déchets de structure et technologiques mis en fûts (B6), des sources (B7), et des déchets au radium et à l'américium (B8).

La grande diversité des déchets B conduit à distinguer des colis types de niveau 2 et 3, quand de besoin.

- ✓ Les colis types B2.1 et B2.2 distinguent des colis de géométries différentes.
- ✓ Pour le colis type B3, au niveau 2, les regroupements des colis ont été définis sur la base des matériaux utilisés pour les conteneurs, et du caractère homogène ou hétérogène du déchet conditionné :
  - B3.1 : déchets hétérogènes contenus dans des enveloppes en béton ;
  - B3.2 : déchets homogènes contenus dans des enveloppes en béton ;
  - B3.3 : déchets hétérogènes contenus dans des enveloppes métalliques.

Le niveau 3 correspond à la prise en compte des natures chimiques des déchets, du risque de production d'hydrogène et des dimensions des colis (les colis types de niveau 3 associés respectivement aux colis types de niveau 2 : B3.1, B3.2 et B3.3 sont classés par ordre croissant de taille) :

- B3.1.1, B3.1.3, B3.2.1, B3.2.2, B3.3.2 : colis générant potentiellement de l'hydrogène ;
- B3.1.2, B3.3.1, B3.3.3, B3.3.4 : colis contenant des matières organiques et générant de l'hydrogène.
- ✓ Les colis types B5 sont différenciés suivant les natures de déchets et leurs caractéristiques associées (chimiques, radiologiques, thermiques) :
  - B5.1 / B5.2 : ces colis types se distinguent des autres déchets de structure conditionnés en CSD-C par leur thermicité plus importante et aussi par la présence de déchets technologiques. Ainsi, ces colis types permettent d'étudier deux populations potentiellement différentes de CSD-C en fonction de leur contenu en déchets technologiques : le colis type B5.1 couvre des déchets technologiques contenant des matières organiques, le colis type B5.2 n'en contenant pas ;
  - B5.3 : il s'agit de déchets de structure seuls, sans matière organique, de très faible thermicité des déchets du fait de leur âge ;
  - B5.4 : ce colis type se distingue par la nature des déchets (magnésiens), l'absence de matière organique, l'absence de thermicité.
- ✓ Les colis types B6 sont différenciés suivant les natures et matériaux de déchets et les géométries d'enveloppes :
  - B6.1 : géométrie d'enveloppe différente de celle des colis types B6.2 à B6.5 (les enveloppes des B6.2 à B6.5 sont identiques) ;
  - B6.2 : déchets de structure constitués d'acier, de zircaloy et d'inconel ;
  - B6.3 : déchets de structure magnésiens ;

- B6.4 : colis contenant des déchets technologiques organiques et générant de l'hydrogène ;
  - B6.5 : colis contenant des déchets technologiques métalliques seuls.
- ✓ Les colis types B7 et B8 sont également différenciés suivant les natures de déchets, les matériaux et les géométries des enveloppes.

COLIS PRIMAIRES DE DECHETS B

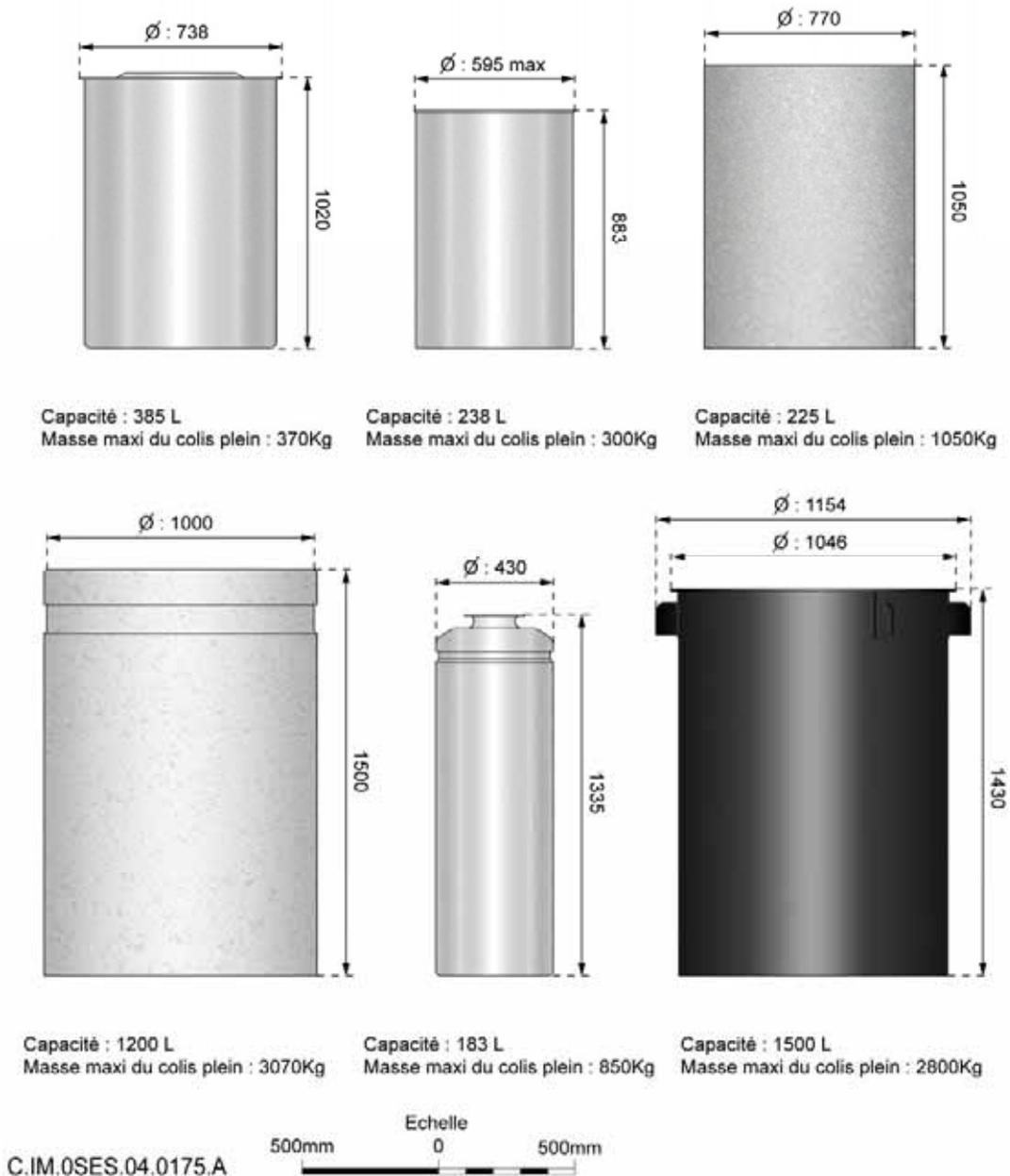


Figure 2.3.7 Schéma et dimensions des colis types de déchets B

Tableau 2.3.2 Liste des colis types de déchets B du modèle d'inventaire

Colis types		Niv.1	Niv.2	Niv.3	Intitulés des déchets regroupés dans les colis types	
Déchets activés	B	B1			CSD-C contenant des déchets activés des réacteurs REP et RNR	
Déchets bitumés		B2	B2.1			Fûts bitumes 238 et 245 litres
			B2.2			Fûts bitumes 428 litres
Déchets technologiques et divers cimentés ou compactés		B3	B3.1	B3.1.1		Conteneurs béton 1 000 litres reconditionnés ou non en conteneurs métalliques
				B3.1.2		Conteneurs en béton (CAC et CBF-C'2) contenant des déchets technologiques divers
				B3.1.3		Conteneurs béton 1 800 litres contenant des déchets divers
			B3.2	B3.2.1		Conteneurs béton 500 litres (boues et concentrats)
				B3.2.2		Conteneurs béton de 1 200 litres (CBF-C'2) contenant des déchets CEDRA et AGATE
			B3.3	B3.3.1		Conteneurs standards de déchets compactés (CSD-C) contenant des déchets alpha
				B3.3.2		Fûts EIP contenant des déchets pulvérulents cimentés
				B3.3.3		Conteneurs en acier de 500 litres contenant des déchets divers
				B3.3.4		Conteneurs en acier de 870 litres contenant des déchets divers
			Déchets de structure cimentés	B4		
Déchets de structure avec ou sans déchets technologiques, compactés		B5	B5.1			CSD-C contenant un mélange de coques et embouts et de déchets technologiques (y compris déchets organiques)
			B5.2			CSD-C contenant un mélange de coques et embouts et de déchets technologiques métalliques
			B5.3			CSD-C contenant des déchets de structure REP (HAO), sans déchet technologique
			B5.4			CSD-C contenant des déchets de structure magnésiens
Déchets de structure et technologiques mis en fûts		B6	B6.1			Conteneurs en acier de 180 litres contenant des déchets d'exploitation AVM
			B6.2			Fûts EIP contenant des déchets de structure métalliques
			B6.3			Fûts EIP contenant des déchets de structure magnésiens
	B6.4				Fûts EIP contenant des déchets technologiques métalliques et organiques	
	B6.5				Fûts EIP contenant des déchets technologiques métalliques	
Sources	B7*	B7.1			Blocs sources	
		B7.2			CSD-C contenant les crayons sources primaires et secondaires REP	
		B7.3			Fûts EIP contenant des sources scellées	
Déchets au radium et à l'américium	B8*	B8.1			Fûts EIP contenant des fûts de sulfates de plomb radifères	
		B8.2			Conteneurs en acier de 870 litres contenant des têtes de paratonnerres au radium ou à l'américium	
		B8.3			Fûts EIP contenant des ORUM	

(\* Les colis types B7 et B8 ne sont pas traités dans la suite du document)

### 2.3.4.3 Les combustibles usés

Les combustibles usés pris en compte sont des combustibles issus de filières arrêtées et de réacteurs de recherche (UNGG, EL4), des combustibles issus des activités de la défense nationale ainsi que des combustibles issus du parc de réacteurs REP.

On distingue trois colis type de niveau 1. Deux correspondent aux combustibles REP d'EDF, UOX/URE (noté CU1) et MOX (noté CU2). Un troisième correspond aux combustibles du CEA (noté CU3).

Pour les colis types CU1 et CU2, l'assemblage combustible de référence correspond à un assemblage de conception FRAGEMA « avancée de 2<sup>ème</sup> génération » à tubes guides épaissis et à gainage en alliage de zirconium. On distingue :

- les assemblages (UOX) pour les réacteurs REP 900 MWe (désignés AFA-2GE ou « courts »<sup>4</sup>) ;
- les assemblages (UOX/URE et MOX) pour les réacteurs REP 1 300 MWe et 1 450 MWe (désigné AFA-2LE ou « longs »<sup>2</sup>).

Les combustibles CU3 regroupent les combustibles des réacteurs de recherche et de la défense nationale. Ils sont en marge des scénarios du modèle d'inventaire et ne sont pas traités dans le présent document.

Tableau 2.3.3 Liste des assemblages types de combustibles usés du modèle d'inventaire

Assemblage type		Niveau 1	Niveau 2	Intitulé	Remarque
CU	Combustibles REP EDF	CU1		Combustibles usés REP UOX et URE	L'assemblage combustible de référence correspond à un assemblage de conception FRAGEMA « avancée de 2 <sup>ème</sup> génération » à tubes guides épaissis et à gainage en alliage de zirconium
		CU2		Combustibles usés REP MOX	
	Combustibles CEA	CU3*		Réacteurs de recherche et défense nationale	

(\* Les combustibles usés CU3 ne sont pas traités dans la suite du document)

### 2.3.4.4 Les inventaires en nombre de colis types

Le Tableau 2.3.4 présente les inventaires en nombre de colis HAVL et en nombre d'assemblages de combustibles usés pour les quatre scénarios de production des déchets (*i.e.* scénarios de gestion des combustibles nucléaires). Ces inventaires reposent sur l'hypothèse d'une reconduction des procédés industriels actuellement mis en œuvre par les producteurs de déchets (vitrification, compactage, cimentation, bitumage) pour les déchets existants non conditionnés et les déchets futurs. Cet inventaire a été réalisé en retenant des hypothèses prudentes, en veillant à disposer de chiffres qui constituent une

<sup>4</sup> Les assemblages AFA-2GE et AFA-2LE ont la même configuration (réseau 17x17 de crayons à pas de 12,6 mm, section 214 mm x 214 mm) mais des longueurs totales différentes : 4 120 mm pour AFA-2GE et 4 870 mm pour AFA-2LE d'où les termes de court et long

enveloppe majorante des productions attendues, notamment pour tenir compte des incertitudes sur le devenir de certains déchets de moyenne activité à vie longue.

Tableau 2.3.4 *Données quantitatives globales des colis de déchets B, des colis de déchets C, et des assemblages de combustibles usés du modèle d'inventaire suivant les scénarios de production des déchets*

COLIS TYPE	S1a		S1b		S1c		S2	
	Nombre	Volume (m <sup>3</sup> )						
<b>B1</b>	2 560	470	2 560	470	2 560	470	2 560	470
<b>B2</b>	104 990	36 060	104 990	36 060	104 990	36 060	104 990	36 060
<b>B3</b>	32 940	27 260	32 940	27 260	32 940	27 260	30 390	24 540
<b>B4</b>	1 520	2 730	1 520	2 730	1 520	2 730	1 520	2 730
<b>B5</b>	42 600	7 790	39 900	7 300	39 900	7 300	13 600	2 490
<b>B6</b>	10 810	4 580	10 810	4 580	10 810	4 580	10 810	4 580
<b>B7</b>	3 045	1 440	3 045	1 440	3 045	1 440	3 045	1 440
<b>B8</b>	1 350	775	1 350	775	1 350	775	1 350	775
<b>Total de colis types B</b>	<b>199 815</b>	<b>81 105</b>	<b>197 115</b>	<b>80 615</b>	<b>197 115</b>	<b>80 615</b>	<b>168 265</b>	<b>73 085</b>
<b>C0</b>	4 120	700	4 120	700	4 120	700	4 120	700
<b>C1</b>	4 640	810	4 640	810	38 350	6 710	4 640	810
<b>C2</b>	990	170	27 460	4 810	0	0	5 920	1 040
<b>C3</b>	13 320	2 330	0	0	0	0	0	0
<b>C4</b>	13 250	2 320	0	0	0	0	0	0
<b>Total de colis types C</b>	<b>36 320</b>	<b>6 330</b>	<b>36 220</b>	<b>6 320</b>	<b>42 470</b>	<b>7 410</b>	<b>14 680</b>	<b>2 550</b>
<b>CU1</b>	0		0		0		54 000*	
<b>CU2</b>	0		5 400		5 400		4 000	
<b>Total d'assemblages CU</b>	<b>0</b>		<b>5 400</b>		<b>5 400</b>		<b>58 000</b>	
<b>Total</b>	<b>236 135</b>		<b>238 735</b>		<b>244 985</b>		<b>240 945</b>	

\* : nombre de colis de stockage à 4 UOX : 13 500

Le Tableau 2.3.4 permet de dégager les éléments suivants :

- ✓ Le nombre de colis types de déchets B varie peu suivant le scénario de gestion des combustibles nucléaires considéré.
- ✓ Au sein des colis types de déchets B, quatre colis types sont majoritaires en nombre de colis : **(i)** les colis de boue bitumées (B2), **(ii)** les colis de déchets technologiques et divers cimentés ou compactés (B3), **(iii)** les déchets de structure avec ou sans déchets technologiques, compactés (B5) et **(iv)** les déchets de structures et technologiques mis en fûts (B6).
- ✓ Les colis de déchets B représentent plus de 80 % du nombre des colis types (somme des colis B, C et de combustibles usés), quel que soit le scénario de gestion des combustibles nucléaires considéré. Viennent ensuite les colis de déchets C (entre 6 % et 17 % du nombre total des colis types) et les assemblages de combustibles usés.

L'importance en nombre de colis primaires de déchets B est sans rapport avec celle de leur inventaire en radioéléments. En effet, celui-ci représente plus de 80 % en nombre et plus de 90 % en volume des déchets HAVL mais moins de 1 % de l'activité totale des déchets HAVL. (cf. 2.3.4.5)

### 2.3.4.5 Les inventaires radioactifs des colis types

Les inventaires radioactifs des colis types ont été établis en considérant uniquement les radionucléides dont les périodes sont supérieures à six mois, et à partir du retour d'expérience des analyses de sûreté menées auparavant par l'Andra et ses homologues étrangers (Andra, 2005j). Ceci conduit à une liste de 144 radionucléides comprenant des produits de fission, des produits d'activation et des actinides, comme indiqué dans l'Encadré 2.2. Comme pour le nombre de colis types, l'inventaire radioactif varie suivant le scénario de production des déchets (*i.e.* scénario de gestion des combustibles nucléaires) (Andra, 2005e).

Ainsi, les colis types n'ont pas les mêmes poids en matière d'inventaire radioactif. Les Figure 2.3.8 et Figure 2.3.9 représentent respectivement l'activité en produits d'activation/produits de fission et l'activité en actinides par colis type.

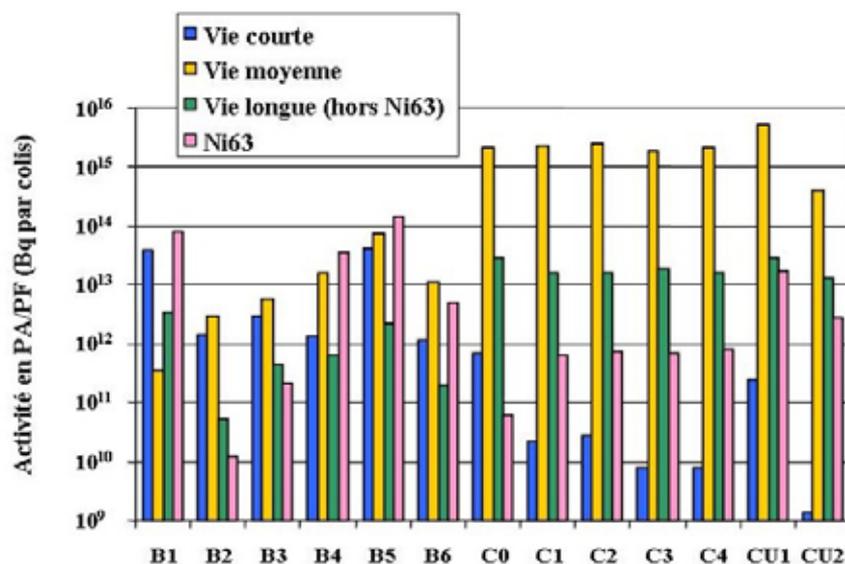


Figure 2.3.8 *Activité en produits d'activation (PA) / produits de fission (PF) de chaque colis type (vie courte : 6 mois < période ≤ 6 ans ; vie moyenne : 6 ans < période ≤ 30 ans ; vie longue : période > 30 ans)*

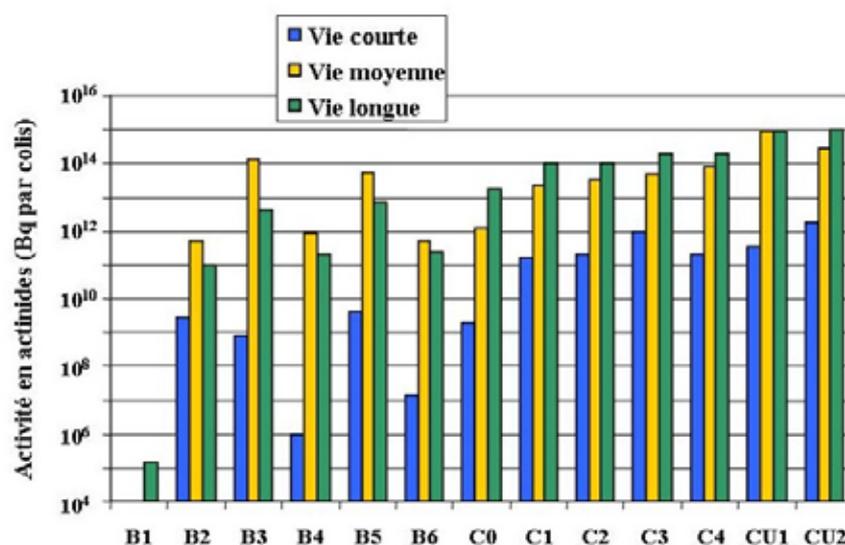


Figure 2.3.9 *Activité en actinides de chaque colis type (vie courte : 6 mois < période ≤ 6 ans ; vie moyenne : 6 ans < période ≤ 30 ans ; vie longue : période > 30 ans)*

Les graphiques de la Figure 2.3.10 illustrent pour quelques radionucléides, notamment à vie longue, leurs inventaires comparés pour les quatre scénarios de production des déchets. Ils font apparaître que les déchets C et les combustibles usés représentent l'essentiel de l'inventaire radioactif de la plupart des radionucléides, comparé à celui des colis types de déchets B. On observe également que l'inventaire total varie d'un scénario à l'autre. Ainsi, les déchets B prédominent pour les produits d'activation formés préférentiellement dans les éléments de structure des assemblages de combustibles, comme  $^{14}\text{C}$ ,  $^{94}\text{Nb}$  et  $^{59}\text{Ni}$  et dans une moindre mesure  $^{36}\text{Cl}$ .

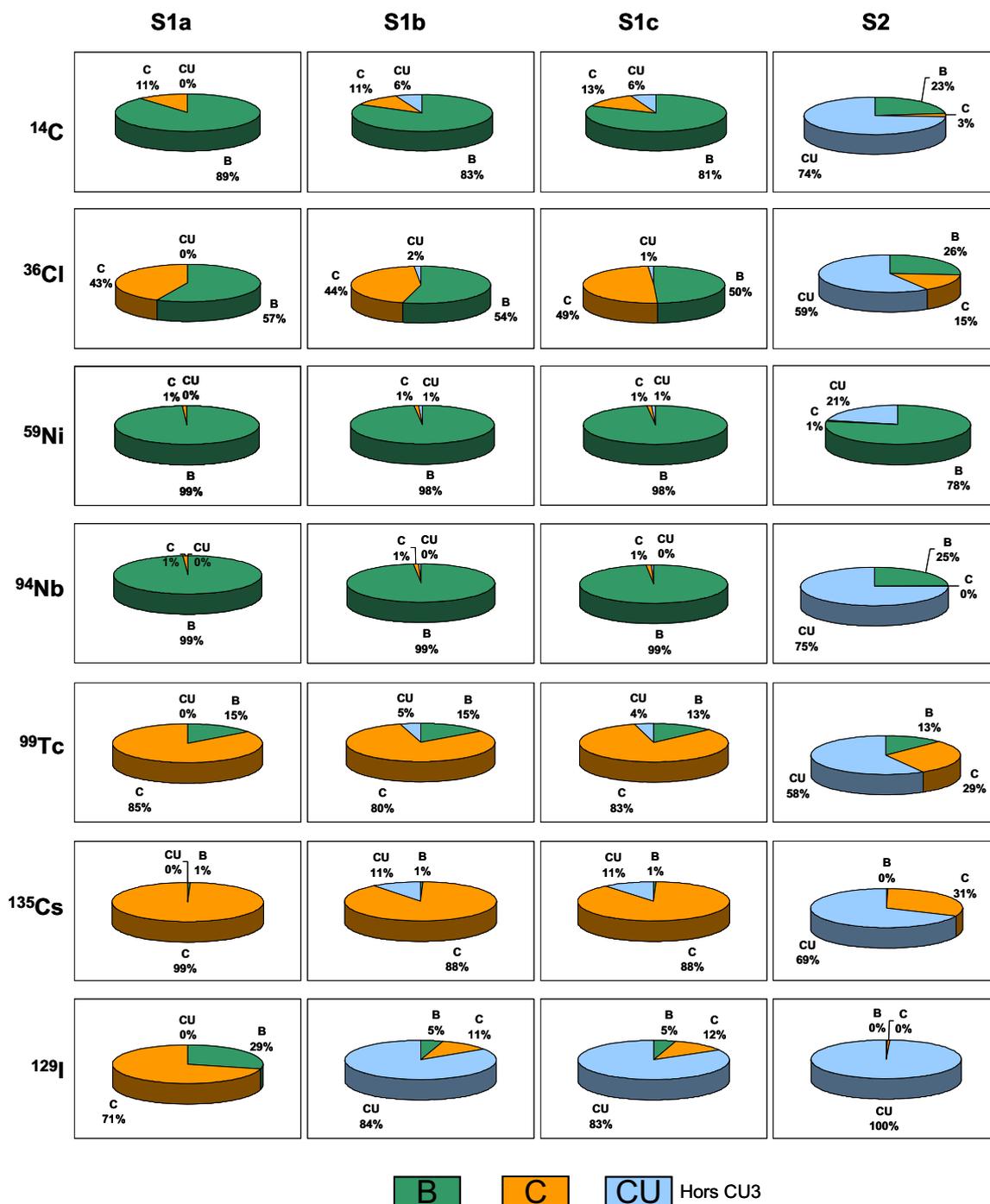


Figure 2.3.10 Distributions relatives en % des inventaires en  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{94}\text{Nb}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$ , et  $^{135}\text{Cs}$  entre les déchets B, les déchets C et les combustibles usés (hors CU3) pour les quatre scénarios de production des déchets

Les graphiques de la Figure 2.3.11 illustrent, pour le scénario S1b, les inventaires relatifs des colis types de déchets B pour quelques radionucléides. Ils montrent par exemple que l'inventaire en produits de fission et en produits d'activation est porté majoritairement par les colis types B5. Pour les autres colis types, l'importance comparée des inventaires varie suivant le radionucléide considéré.

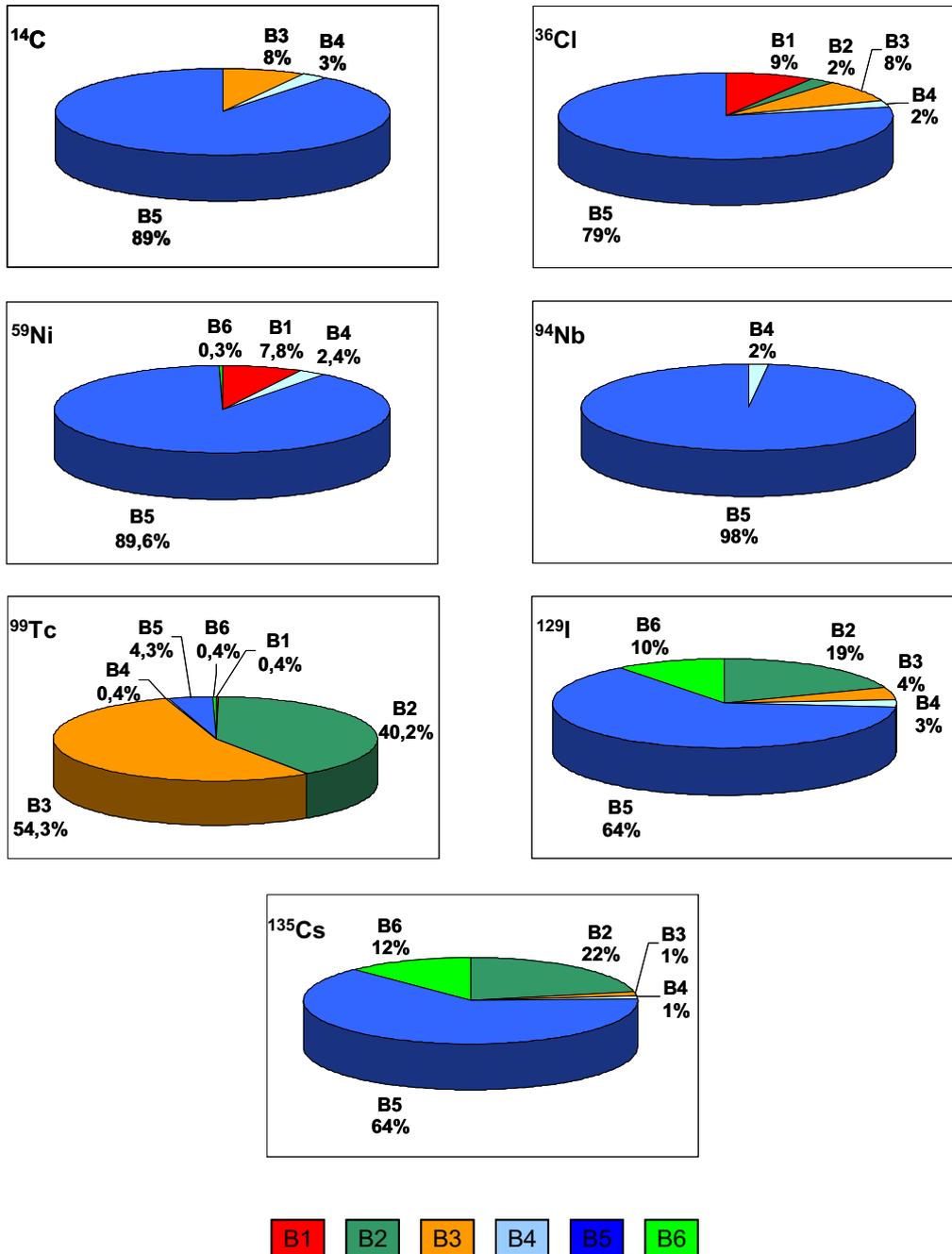


Figure 2.3.11 Distributions relatives en % des inventaires en  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{94}\text{Nb}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$ , et  $^{135}\text{Cs}$  entre les colis types de déchets B pour le scénario de gestion des combustibles nucléaires S1b

Encadré 2.2 La liste des 144 radionucléides retenus dans le modèle d'inventaire des déchets HAVL et des combustibles usés

Isotope	Période (an)	Isotope	Période (an)	Isotope	Période (an)	Isotope	Période (an)
<b>Actinides</b>							
<sup>226f</sup> Ra	1,60·10 <sup>3</sup>	<sup>236f</sup> U	2,34·10 <sup>7</sup>	<sup>244f</sup> Pu	8,00·10 <sup>7</sup>	<sup>247f</sup> Bk	1,38·10 <sup>3</sup>
<sup>228f</sup> Ra	5,75	<sup>238f</sup> U	4,47·10 <sup>9</sup>	<sup>241f</sup> Am	4,33·10 <sup>2</sup>	<sup>249f</sup> Bk	8,76·10 <sup>-1</sup>
<sup>227f</sup> Ac	2,18·10 <sup>1</sup>	<sup>235f</sup> Np	1,08	<sup>242m</sup> Am	1,41·10 <sup>2</sup>	<sup>248f</sup> Cf	9,13·10 <sup>-1</sup>
<sup>228f</sup> Th	1,91	<sup>236f</sup> Np	1,52·10 <sup>5</sup>	<sup>243f</sup> Am	7,37·10 <sup>3</sup>	<sup>249f</sup> Cf	3,51·10 <sup>2</sup>
<sup>229f</sup> Th	7,34·10 <sup>3</sup>	<sup>237f</sup> Np	2,14·10 <sup>6</sup>	<sup>242f</sup> Cm	4,46·10 <sup>-1</sup>	<sup>250f</sup> Cf	1,31·10 <sup>1</sup>
<sup>230f</sup> Th	7,54·10 <sup>4</sup>	<sup>210f</sup> Pb	2,20·10 <sup>1</sup>	<sup>243f</sup> Cm	3,00·10 <sup>1</sup>	<sup>251f</sup> Cf	8,89·10 <sup>2</sup>
<sup>232f</sup> Th	1,41·10 <sup>10</sup>	<sup>236f</sup> Pu	2,90	<sup>244f</sup> Cm	1,81·10 <sup>1</sup>	<sup>252f</sup> Cf	2,65
<sup>231f</sup> Pa	3,28·10 <sup>4</sup>	<sup>238f</sup> Pu	8,77·10 <sup>1</sup>	<sup>245f</sup> Cm	8,50·10 <sup>3</sup>	<sup>252f</sup> Es	1,29
<sup>232f</sup> U	6,98·10 <sup>1</sup>	<sup>239f</sup> Pu	2,41·10 <sup>4</sup>	<sup>246f</sup> Cm	4,73·10 <sup>3</sup>	<sup>254f</sup> Es	7,54·10 <sup>-1</sup>
<sup>233f</sup> U	1,59·10 <sup>5</sup>	<sup>240f</sup> Pu	6,56·10 <sup>3</sup>	<sup>247f</sup> Cm	1,60·10 <sup>7</sup>		
<sup>234f</sup> U	2,46·10 <sup>5</sup>	<sup>241f</sup> Pu	1,44·10 <sup>1</sup>	<sup>248f</sup> Cm	3,40·10 <sup>5</sup>		
<sup>235f</sup> U	7,04·10 <sup>8</sup>	<sup>242f</sup> Pu	3,74·10 <sup>5</sup>	<sup>250f</sup> Cm	8,00·10 <sup>3</sup>		

Isotope	Période (an)	Isotope	Période (an)	Isotope	Période (an)	Isotope	Période (an)
<b>Produits de fission et produits d'activation</b>							
<sup>3f</sup> H	1,23·10 <sup>1</sup>	<sup>85f</sup> Kr	1,07·10 <sup>1</sup>	<sup>129f</sup> I	1,57·10 <sup>7</sup>	<sup>209f</sup> Po	1,00·10 <sup>2</sup>
<sup>10f</sup> Be	1,60·10 <sup>6</sup>	<sup>87f</sup> Rb	4,80·10 <sup>10</sup>	<sup>134f</sup> Cs	2,06	<sup>157f</sup> Tb	9,82·10 <sup>1</sup>
<sup>14f</sup> C	5,73·10 <sup>3</sup>	<sup>90f</sup> Sr	2,91·10 <sup>1</sup>	<sup>135f</sup> Cs	2,30·10 <sup>6</sup>	<sup>158f</sup> Tb	1,81·10 <sup>2</sup>
<sup>22f</sup> Na	2,60	<sup>93f</sup> Zr	1,53·10 <sup>6</sup>	<sup>137f</sup> Cs	3,00·10 <sup>1</sup>	<sup>154f</sup> Dy	2,85·10 <sup>6</sup>
<sup>26f</sup> Al	7,20·10 <sup>5</sup>	<sup>91f</sup> Nb	6,80·10 <sup>2</sup>	<sup>133f</sup> Ba	1,05·10 <sup>1</sup>	<sup>163f</sup> Ho	4,57·10 <sup>3</sup>
<sup>32f</sup> Si	1,72·10 <sup>2</sup>	<sup>92f</sup> Nb	3,50·10 <sup>7</sup>	<sup>137f</sup> La	6,00·10 <sup>4</sup>	<sup>166m</sup> Ho	1,20·10 <sup>3</sup>
<sup>36f</sup> Cl	3,02·10 <sup>5</sup>	<sup>93m</sup> Nb	1,64·10 <sup>1</sup>	<sup>144f</sup> Ce	7,80·10 <sup>-1</sup>	<sup>171f</sup> Tm	1,92
<sup>39f</sup> Ar	2,69·10 <sup>2</sup>	<sup>94f</sup> Nb	2,03·10 <sup>4</sup>	<sup>143f</sup> Pm	7,26·10 <sup>-1</sup>	<sup>173f</sup> Lu	1,37
<sup>42f</sup> Ar	3,30·10 <sup>1</sup>	<sup>93f</sup> Mo	3,50·10 <sup>3</sup>	<sup>144f</sup> Pm	9,95·10 <sup>-1</sup>	<sup>174f</sup> Lu	3,31
<sup>40f</sup> K	1,28·10 <sup>9</sup>	<sup>97f</sup> Tc	2,60·10 <sup>6</sup>	<sup>145f</sup> Pm	1,77·10 <sup>1</sup>	<sup>176f</sup> Lu	3,61·10 <sup>10</sup>
<sup>41f</sup> Ca	1,03·10 <sup>5</sup>	<sup>98f</sup> Tc	4,20·10 <sup>6</sup>	<sup>146f</sup> Pm	5,53	<sup>172f</sup> Hf	1,87
<sup>44f</sup> Ti	4,72·10 <sup>1</sup>	<sup>99f</sup> Tc	2,13·10 <sup>5</sup>	<sup>147f</sup> Pm	2,62	<sup>178n</sup> Hf	3,10·10 <sup>1</sup>
<sup>49f</sup> V	9,04·10 <sup>-1</sup>	<sup>106f</sup> Ru	1,01	<sup>145f</sup> Sm	9,31·10 <sup>-1</sup>	<sup>182f</sup> Hf	8,99·10 <sup>6</sup>
<sup>53f</sup> Mn	3,70·10 <sup>6</sup>	<sup>101f</sup> Rh	3,30	<sup>146f</sup> Sm	1,03·10 <sup>8</sup>	<sup>179f</sup> Ta	1,77
<sup>54f</sup> Mn	8,56·10 <sup>-1</sup>	<sup>102f</sup> Rh	2,90	<sup>151f</sup> Sm	8,87·10 <sup>1</sup>	<sup>186m</sup> Re	2,00·10 <sup>5</sup>
<sup>55f</sup> Fe	2,70	<sup>102m</sup> Rh	5,67·10 <sup>-1</sup>	<sup>150f</sup> Eu	3,42·10 <sup>1</sup>	<sup>194f</sup> Os	5,99
<sup>60f</sup> Fe	7,51·10 <sup>6</sup>	<sup>107f</sup> Pd	6,50·10 <sup>6</sup>	<sup>152f</sup> Eu	1,33·10 <sup>1</sup>	<sup>192n</sup> Ir	2,41·10 <sup>2</sup>
<sup>57f</sup> Co	7,43·10 <sup>-1</sup>	<sup>108m</sup> Ag	4,18·10 <sup>2</sup>	<sup>154f</sup> Eu	8,60	<sup>193f</sup> Pt	5,07·10 <sup>1</sup>
<sup>60f</sup> Co	5,27	<sup>110m</sup> Ag	6,84·10 <sup>-1</sup>	<sup>155f</sup> Eu	4,96	<sup>195f</sup> Au	5,10·10 <sup>-1</sup>
<sup>59f</sup> Ni	7,50·10 <sup>4</sup>	<sup>109f</sup> Cd	1,27	<sup>148f</sup> Gd	7,45·10 <sup>1</sup>	<sup>194f</sup> Hg	5,20·10 <sup>2</sup>
<sup>63f</sup> Ni	1,00·10 <sup>2</sup>	<sup>113m</sup> Cd	1,41·10 <sup>1</sup>	<sup>150f</sup> Gd	1,79·10 <sup>6</sup>	<sup>204f</sup> Tl	3,78
<sup>65f</sup> Zn	6,69·10 <sup>-1</sup>	<sup>119m</sup> Sn	8,02·10 <sup>-1</sup>	<sup>153f</sup> Gd	6,63·10 <sup>-1</sup>	<sup>202f</sup> Pb	5,26·10 <sup>4</sup>
<sup>68f</sup> Ge	7,41·10 <sup>-1</sup>	<sup>121m</sup> Sn	5,00·10 <sup>1</sup>	<sup>208f</sup> Bi	3,68·10 <sup>5</sup>	<sup>205f</sup> Pb	1,52·10 <sup>7</sup>
<sup>79f</sup> Se	6,50·10 <sup>4</sup>	<sup>126f</sup> Sn	1,00·10 <sup>5</sup>	<sup>210m</sup> Bi	3,00·10 <sup>6</sup>	<sup>207f</sup> Bi	3,80·10 <sup>1</sup>
<sup>81f</sup> Kr	2,10·10 <sup>5</sup>	<sup>125f</sup> Sb	2,73	<sup>208f</sup> Po	2,90		

### 2.3.4.6 Le dégagement thermique des colis types de déchets

La radioactivité présente dans les déchets HAVL et les assemblages de combustibles usés (Encadré 2.3) s'accompagne d'un dégagement de chaleur (Encadré 2.4).

Du fait de leurs radioactivités élevées, les colis de déchets C et les assemblages de combustibles usés émettent des quantités de chaleur importantes : elles sont de plusieurs milliers de watts par colis pour les colis de déchets C à la sortie de leur production, et de plusieurs milliers de watts par assemblage de combustibles usés 3 ans après leur sortie des réacteurs. Corrélativement à la décroissance radioactive, les dégagements de chaleur décroissent ensuite pendant plusieurs centaines d'années (déchets C) à plusieurs milliers d'années (combustibles usés) (Figure 2.3.12).

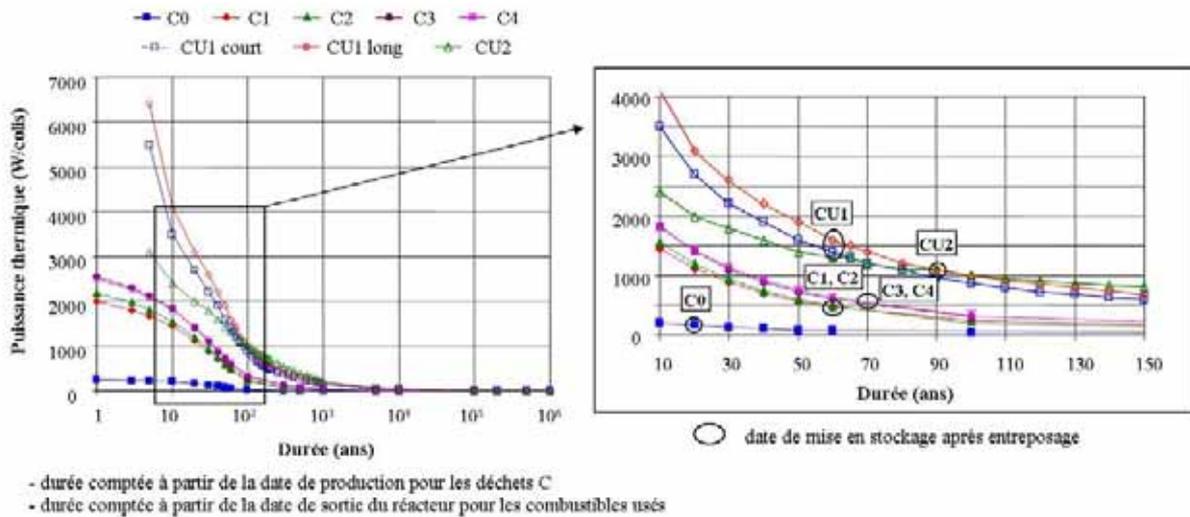


Figure 2.3.12 Courbes des dégagements thermiques (i.e. puissances thermiques) des colis types de déchets C et des colis types de combustibles usés (Andra, 2005e)

Compte tenu de leur radioactivité plus faible que celles des colis de déchets C et des assemblages de combustibles usés, les colis de déchets B dégagent peu ou pas de chaleur. Ainsi, parmi l'ensemble des colis type de déchets B, les colis type B1 et B5 sont considérés comme faiblement exothermiques. Leurs dégagements thermiques sont de l'ordre de quelques watts à quelques dizaines de watts lors de la production des colis, et s'atténuent très fortement en quelques dizaines d'années (Figure 2.3.13).

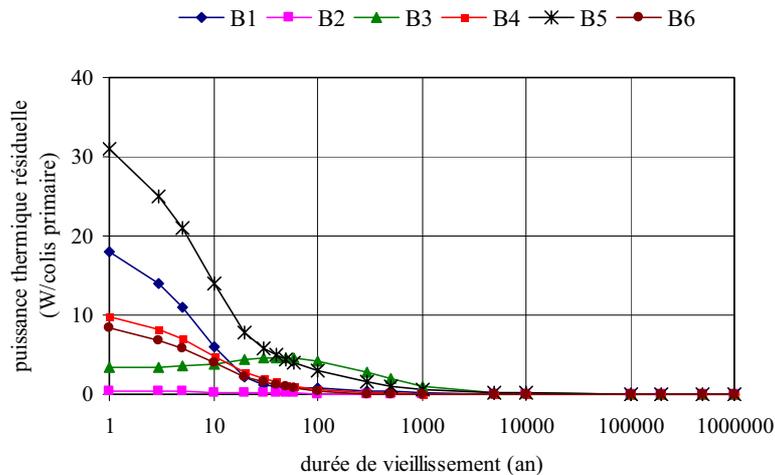


Figure 2.3.13 Courbes des dégagements thermiques (i.e. puissances thermiques) des colis types de déchets B (Andra, 2005e)

### 2.3.4.7 Les débits de dose externes des colis primaires

L'activité  $\beta\gamma$  des colis de déchets primaires est à l'origine d'une irradiation externe. Parmi les colis primaires, les colis de déchets C à un moindre degré, les combustibles usés et les colis B1 et B5 sont ceux auxquels est associé le niveau d'irradiation externe le plus élevé, tous rayonnements confondus (Andra, 2005i), comme indiqué dans le Tableau 2.3.5.

Tableau 2.3.5 *Débits de dose maximums au contact des différents colis primaires au moment de leur conditionnement dans les colis de stockage*

Type de déchets	Type de colis primaire	Nature du contenu	Débit de dose maximum au contact des colis primaires ou des assemblages de combustibles usés (Sv.h <sup>-1</sup> )
<b>B</b>	<b>B1</b>	Déchets activés compactés	25
	<b>B2</b>	Déchets bitumés	2
	<b>B3</b>	Déchets technologiques compactés ou cimentés	0,5
	<b>B4</b>	Déchets de structures cimentés	0,5
	<b>B5</b>	Déchets de structures compactés avec ou sans déchets technologiques	15
	<b>B6</b>	Déchets de structure et technologiques mis en fût	2
<b>C</b>	<b>C</b>	Déchets vitrifiés	250
<b>CU</b>	<b>CU1</b>	Assemblage de combustibles usés UOX/URE	25
	<b>CU2</b>	Assemblage de combustibles usés MOX	15

### *Encadré 2.3 Les rayonnements émis par les radionucléides*

Les radionucléides émettent trois types de rayonnement :

#### ***Le rayonnement Alpha ( $\alpha$ )***

La radioactivité alpha ( $\alpha$ ) est l'émission d'un noyau d'hélium composé de 2 protons et 2 neutrons, donc de charge électrique +2. Elle concerne surtout les noyaux les plus lourds, donc les actinides. De tels noyaux, instables, émettent un noyau léger d'hélium pour diminuer leur charge électrique et ainsi devenir plus stables. L'énergie de répulsion coulombienne libérée lors d'une désintégration alpha se retrouve sous forme d'énergie cinétique partagée entre la particule  $\alpha$  et le noyau qui recule. Les particules  $\alpha$  emportent environ 98 % de l'énergie, soit de l'ordre de quelques millions d'électronvolts (MeV). Le rayonnement  $\alpha$  est très vite arrêté par la matière : sa portée dans l'air est de quelques centimètres et une feuille de papier l'arrête.

Les périodes des désintégrations alpha sont souvent longues ; c'est le cas du thorium-232 ( $^{232}\text{Th}$ ) et l'uranium-238 ( $^{238}\text{U}$ ) qui mettent des milliards d'années à se désintégrer, mais le radium-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ), par exemple, se désintègre avec une période de 1 600 ans.

#### ***Le rayonnement Gamma ( $\gamma$ )***

Il est de même nature que les rayons X ou encore que la lumière émise par les atomes (rayonnement électromagnétique), mais l'énergie qu'il transporte est beaucoup plus élevée : de 100 000 à quelques millions d'électronvolts. L'émission d'un gamma suit généralement une désintégration alpha ( $\alpha$ ) ou bêta ( $\beta$ ) ou encore la capture d'un neutron par un noyau. En effet, ces événements laissent généralement le noyau dans un état excité, c'est-à-dire avec un supplément d'énergie par rapport à son état naturel que les physiciens appellent « fondamental ». Le noyau perd alors cet excès d'énergie en une ou plusieurs étapes, émettant à chaque fois un « grain d'énergie électromagnétique », un photon gamma. Le rayonnement gamma est très pénétrant : il peut traverser plusieurs centimètres de plomb.

#### ***Le rayonnement Bêta ( $\beta$ )***

La radioactivité  $\beta^-$  est l'émission d'un électron et d'un antineutrino accompagnant la transformation d'un neutron en proton. La radioactivité  $\beta^+$ , est la transformation d'un proton en neutron avec émission d'un positon et d'un neutrino. L'énergie de la désintégration se partage entre les trois participants : le noyau qui recule, l'électron (ou le positon) et l'antineutrino (ou le neutrino). Le noyau, dont la masse est très grande devant celle des deux autres participants, n'emporte pratiquement pas d'énergie. L'excès de neutrons étant fréquent parmi les noyaux radioactifs naturels, la radioactivité  $\beta^-$  est de loin la plus observée. Le rayonnement  $\beta$  est plus pénétrant que le rayonnement  $\alpha$  mais moins que le rayonnement  $\gamma$  : sa portée dans l'air est de quelques mètres et il suffit d'une feuille d'aluminium pour l'arrêter.

Un exemple de radioactivité  $\beta^-$  est celui d'un isotope naturel à vie très longue du Potassium, le potassium-40 ( $^{40}\text{K}$ ), contenu naturellement dans le corps humain, qui se désintègre vers le calcium-40 ( $^{40}\text{Ca}$ ).

**Encadré 2.4 L'origine du dégagement thermique des déchets HAVL et des combustibles usés**

**Les interactions rayonnement-matière**

Les éléments radioactifs contenus dans les déchets émettent des rayonnements  $\beta/\gamma$  et  $\alpha$ , qui sont partiellement ou totalement ralentis au sein des déchets et/ou des matrices de conditionnement des déchets, comme par exemple dans le verre. Tout ou partie de l'énergie cinétique de ces rayonnements est alors transformée en chaleur.

La quantité de chaleur dégagée par les déchets au cours du temps dépend donc principalement de la nature et de la quantité des éléments radioactifs qu'ils contiennent, et elle décroît proportionnellement à leur décroissance radioactive.

Le rayonnement  $\gamma$  a une contribution au dégagement total de chaleur globalement plus importante que celle du rayonnement  $\alpha$ . Il correspond pour l'essentiel à des radionucléides de vie courte à moyenne, notamment le  $^{137}\text{Cs}$  (et  $^{90}\text{Sr}$ ) dont la période radioactive est de 30 ans environ ou le  $^{60}\text{Co}$  dont la période radioactive est de 5,2 ans environ.

**Le cas des déchets vitrifiés et des combustibles usés**

Les déchets vitrifiés et les assemblages de combustibles usés ont des inventaires élevés en  $^{137}\text{Cs}$ . C'est la raison pour laquelle leurs dégagements thermiques sont particulièrement élevés, environ plusieurs milliers de watts durant les premières dizaines d'années après la fabrication des colis de déchets vitrifiés ou après la sortie réacteur pour les assemblages de combustibles usés. L'activité  $\beta/\gamma$  totale diminue ensuite d'un facteur 2 environ tous les 30 ans (période du  $^{137}\text{Cs}$  et du  $^{90}\text{Sr}$ ), pour atteindre quelques centaines de watts au bout de 100 ans. Au-delà de quelques centaines d'années, les émetteurs  $\beta/\gamma$  sont en quantité plus faible que celle des émetteurs alpha à vie moyenne et longue. Le dégagement thermique est alors principalement dû aux émetteurs  $\alpha$ , et la chaleur émise est plus faible, de l'ordre de quelques dizaines de watts. Les combustibles usés dont l'inventaire en émetteurs  $\alpha$  est plus élevé que celui des déchets vitrifiés, ont une décroissance thermique plus lente que celle des déchets vitrifiés.

**Le cas des déchets B**

Le  $^{60}\text{Co}$  dont l'inventaire est plus important que celui du  $^{137}\text{Cs}$  joue le rôle principal dans le dégagement thermique des déchets B, en particulier pour les colis types B5 et B1. Compte tenu de sa période de 5 ans, la décroissance du dégagement thermique des déchets B est importante durant les premières dizaines d'années, pour atteindre des valeurs de quelques watts/colis primaire à moins de 1 watt/colis primaire au bout de 100 ans.

## 2.4 Les concepts de stockage (Andra, 2005i)

Les options techniques proposées pour la conception des installations souterraines et des colis de stockage, répondent à trois besoins (Andra, 2005i) :

- ✓ les fonctions de sûreté à long terme,
- ✓ la réversibilité et la souplesse d'exploitation,
- ✓ la sécurité et la sûreté de l'exploitation,

auxquelles s'ajoute une recherche de compacité.

Elles sont définies sur la base **(i)** des inventaires et des caractéristiques des déchets HAVL et des combustibles usés et **(ii)** de l'ensemble des caractéristiques géométriques, géologiques, géochimiques, hydrogéologiques, géomécaniques, etc., de la couche du Callovo-Oxfordien.

### 2.4.1 La sûreté à long terme et la réversibilité

#### 2.4.1.1 Les fonctions de sûreté d'un stockage à long terme

L'objectif fondamental de la gestion à long terme des déchets à haute activité et à vie longue (HAVL) est de protéger l'homme et l'environnement vis-à-vis des risques associés à l'existence des déchets, tant au cours de la phase d'exploitation industrielle que sur le long terme. La réponse apportée par le stockage repose sur le confinement des déchets dans la couche du Callovo-Oxfordien. Il s'effectue de manière passive sur de grandes échelles de temps, étudiées jusqu'au million d'années.

De plus, les architectures et les concepts de stockage proposés incluent la mise en œuvre de la réversibilité et les dispositions susceptibles de la faciliter. L'Andra l'a notamment traduite par la flexibilité du mode de gestion d'une installation de stockage.

Cet objectif est rappelé dans la règle fondamentale de sûreté (RFS) n° III.2.f : "La protection des personnes et de l'environnement à court et à long terme constitue l'objectif fondamental assigné à un centre de stockage de déchets en formation géologique profonde". Cette protection des personnes et de l'environnement est réalisée en s'opposant à la dissémination des radionucléides contenus dans les déchets, sans reposer à terme sur une maintenance ou une surveillance. La RFS précise en effet : "Elle [la protection des personnes et de l'environnement] doit être assurée envers les risques liés à la dissémination de substances radioactives dans toutes les situations prises en compte sans dépendre d'un contrôle institutionnel sur lequel on ne peut se reposer de façon certaine au-delà d'une période limitée" (RFS n° III.2.f, 10 juin 1991).

Pour s'opposer à la dissémination radioactive aux différentes échelles de temps, on confère à une installation de stockage en formation géologique profonde différentes fonctions de sûreté. En se complétant mutuellement, celles-ci optimisent les performances globales du système. En offrant une certaine redondance, elles permettent de mieux résister à une défaillance ou à une agression externe.

On notera d'abord que le stockage en profondeur met les déchets à l'abri de phénomènes d'érosion et des principales activités humaines, qui n'affectent, à l'échelle de centaines de milliers d'années, qu'une épaisseur superficielle de terrain (cf. § 9 sur les évolutions géologique et climatique à long terme).

Dans ce contexte, les fonctions de sûreté peuvent être résumées comme suit :

(i) *s'opposer à la circulation d'eau dans le stockage :*

Les formations géologiques profondes sont initialement saturées en eau. L'arrivée d'eau, et son renouvellement au voisinage des déchets, constituent le principal facteur susceptible d'altérer les colis et de permettre le relâchement d'éléments radioactifs à l'intérieur d'un stockage (cf. § 7 sur l'évolution chimique du stockage). Une circulation convective de cette eau constitue ainsi un vecteur potentiel d'entraînement des radionucléides (cf. § 10 sur le transfert des radionucléides).

(ii) *limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage*, ce qui renvoie notamment à un besoin de "protéger" les déchets.

L'arrivée d'eau sur les déchets ne pouvant pas être exclue à terme (cf. § 6 sur l'évolution hydraulique du stockage et de son environnement géologique), il importe de limiter le relâchement des éléments radioactifs dans l'eau, de les "immobiliser" dans les déchets ou au plus près.

Pour ce faire, on cherche en premier lieu à disposer de colis de déchets évitant la dispersion des radionucléides, par exemple grâce à la matrice dans laquelle sont incorporés les radionucléides ou aux conteneurs dans lesquels les déchets sont placés. L'altération aqueuse des déchets et de leur conditionnement est limitée en les plaçant dans des conditions d'environnement, physiques et chimiques, favorables.

(iii) *retarder et atténuer la migration des radionucléides vers l'environnement.*

Afin de protéger l'homme et l'environnement des éléments radioactifs qui auront pu être relâchés par les déchets, une fonction du stockage est de retarder et d'atténuer, dans l'espace et le temps, le flux relâché.

La formation du Callovo-Oxfordien est ainsi mobilisée pour sa faible perméabilité, les faibles coefficients de diffusion des solutés et sa capacité de rétention. La migration des radionucléides peut aussi être retardée à l'intérieur de certains composants du stockage.

Pour cela, il convient :

- de **mobiliser le plus largement les propriétés favorables des argilites du Callovo-Oxfordien** (faible perméabilité, capacité de rétention, propriétés géochimiques, environnement hydrogéologique). L'âge de la formation, sa stabilité tectonique, sa profondeur confèrent à la couche du Callovo-Oxfordien une grande stabilité de ses propriétés sur le million d'années.

Et donc corrélativement :

- de **préserver les propriétés favorables du milieu géologique, limiter les perturbations induites par le stockage**, en maîtrisant les perturbations qui pourraient résulter i) du creusement des ouvrages souterrains du stockage, en particulier la zone mécaniquement endommagée de Callovo-Oxfordien autour des ouvrages du stockage, ii) des matériaux rapportés, en particulier l'effet des eaux interstitielles des bétons sur les argilites et iii) de la présence des déchets, notamment leur éventuelle charge thermique.

### 2.4.1.2 La prise en compte de la réversibilité

La réversibilité peut être définie comme la possibilité d'un pilotage progressif et « flexible » du processus de stockage en laissant aux générations à venir une liberté de décision sur ce dernier.

Dans cette optique, le processus de stockage peut être décomposé en une succession d'étapes à franchir. Il s'agit alors d'offrir une souplesse aussi grande que possible dans la gestion de chaque étape, notamment en ménageant la possibilité d'un temps d'attente et d'observation, avant de décider de passer à l'étape suivante, ou encore celle de revenir en arrière.

Elle couvre ainsi un champ d'action plus large que la "récupérabilité" des colis et peut s'évaluer dans ce cadre par :

- (i) la capacité de retirer des colis stockés,
- (ii) la capacité d'action sur le processus de stockage,
- (iii) la possibilité de faire évoluer la conception des ouvrages au cours du processus.

Au final, elle concourt à fournir un outil de pilotage du stockage en fonction des attentes des diverses générations concernées.

## 2.4.2 Les réponses de la conception à la sûreté et à la réversibilité

### 2.4.2.1 Un positionnement du stockage au milieu de la couche du Callovo-Oxfordien

Afin de tenir compte de la structure géologique quasi horizontale de la couche du Callovo-Oxfordien et préserver une distance minimale suffisante entre le stockage et les formations encaissantes de la couche du Callovo-Oxfordien, le stockage est construit sur un seul plan au sein de la couche.

Au niveau du laboratoire de recherche souterrain de Meuse / Haute-Marne, la couche du Callovo-Oxfordien a une épaisseur de 135 mètres environ. Le stockage est donc positionné au milieu de la couche du Callovo-Oxfordien ; cela correspond à une distance de 65 mètres du toit et du mur de la couche avec le plan médian du stockage, qui garantit une garde de 60 mètres d'argilites entre le stockage (« d'épaisseur » moyenne de 10 mètres) et les formations encaissantes de l'Oxfordien carbonaté et du Dogger (Figure 2.4.1).

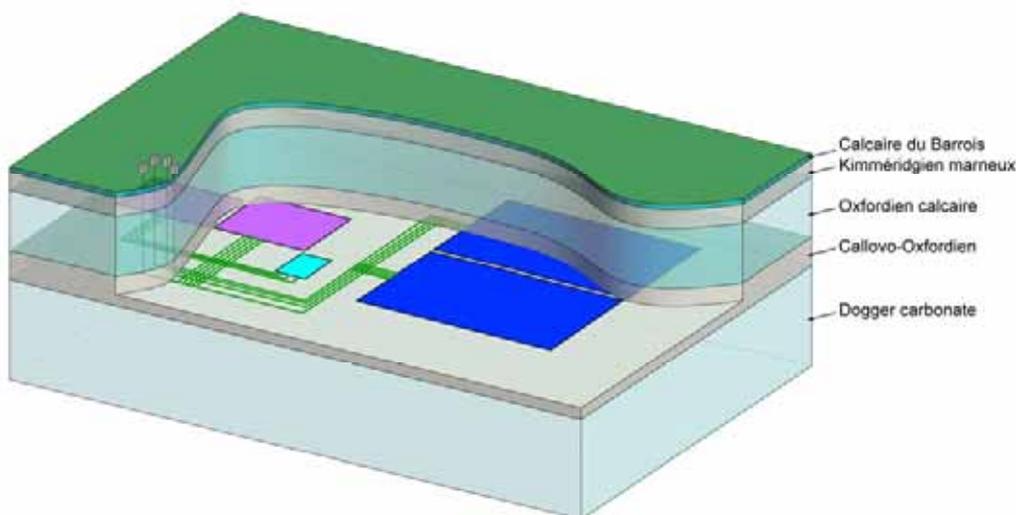


Figure 2.4.1 Schéma de la localisation du stockage au milieu de la couche du Callovo-Oxfordien (localisation de référence du laboratoire de recherche souterrain)

L'épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien augmente depuis le laboratoire souterrain de recherche sur le reste de la zone de transposition (voir définition au paragraphe 2.2 et Encadré 3.2) ; pour toute autre position du stockage au sein de la zone de transposition, la distance 65 mètres entre le toit de la couche et le plan médian du stockage est retenue par convention.

#### **2.4.2.2 Une orientation privilégiée des ouvrages limitant les perturbations mécaniques**

Afin de limiter les sollicitations mécaniques des ouvrages du stockage sur les argilites en champ proche, en particulier la formation d'une zone de perméabilité plus grande que celle initiale des argilites, qui pourrait augmenter les flux d'eau dans le stockage ou diminuer significativement les temps de migration des radionucléides relâchés par les colis, les alvéoles de stockage et les galeries dans lesquelles sont prévus les scellements de fermeture hydraulique du stockage sont orientées suivant la direction de la contrainte mécanique majeure (cf. § 8).

#### **2.4.2.3 Une compacité du stockage limitant les perturbations mécaniques**

De manière générale, les vides, les jeux résiduels dans le stockage après fermeture sont minimisés afin de conférer au stockage une compacité limitant les déformations mécaniques du stockage et de son environnement géologique en grand. C'est en particulier l'objet du remblayage des galeries avec un remblai le plus dense possible.

#### **2.4.2.4 Une limitation de l'élévation de température liée au dégagement de chaleur des colis de déchets**

- **Une température maximale de 90 °C pour les déchets C et les combustibles usés**

Les déchets C et les combustibles usés se caractérisent par un dégagement thermique notable. À ce stade des études, afin de rester dans un domaine de température aujourd'hui maîtrisé, en matière (i) d'évolution des matériaux, (ii) de connaissance et de modélisation des phénomènes, et (iii) d'effets limités ou nuls sur les propriétés des composants du stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien, une température limite de 90 °C est définie pour les déchets C au contact des argilites et les combustibles usés au contact de la barrière ouvragée (Encadré 2.5).

- **Une température maximale de 70 °C pour les déchets B (exothermiques)**

Pour les déchets B, la température maximale retenue est de 70 °C. Plus spécifiquement, les modules de stockage de colis types B2 (boues bitumées) sont conçus de manière à ce que la température dans les alvéoles soit inférieure à 30 °C, afin de préserver l'intégrité du bitume et sa capacité de confinement (Encadré 2.5).

- **Un temps d'entreposage préalable avant la mise en stockage pour les déchets C et les combustibles usés**

Le respect de la température maximale conduit à une distribution adaptée des colis (*i.e.* alvéoles de stockage) au sein du stockage (cf. § 2.4.2.5 suivant) et à des durées d'entreposage préalable au plus tôt pour les options proposées :

- 60 ans pour les C1 et C2
- 70 ans pour les C3 et C4
- 60 ans pour les CU1
- 90 ans pour les CU2

*Encadré 2.5 Les critères thermiques retenus pour la conception du stockage*

Le dimensionnement « thermique » de l'architecture du stockage consiste principalement à définir le nombre de colis de déchets par alvéole, les distances entre alvéoles voisines et les temps d'entreposage préalable des colis de déchets (*i.e.* puissance thermique au moment de la mise en stockage). Il répond à la définition de "critères thermiques", qui sont des seuils de température à ne pas dépasser ou des gammes de température admissibles pour les différents composants du stockage. En l'état actuel des connaissances, ces seuils sont définis par rapport **(i)** à la connaissance des comportements phénoménologiques des composants du stockage et des radionucléides, et **(ii)** aux effets de la température sur ces comportements.

*Etat et maîtrise de la connaissance des comportements phénoménologiques*

- ✓ De manière générale, les températures supérieures à 100 °C, associées à des gradients de température élevés (supérieurs à quelques degrés par mètre) accroissent la réactivité chimique des argilites, des bétons et des métaux, et sont à l'origine de phénomènes hydraulique et mécanique complexes. En outre les difficultés expérimentales d'acquisition des connaissances phénoménologiques sont alors nombreuses. À ce stade des études sur la faisabilité du stockage, il a donc été décidé de retenir une température maximale dans le stockage de 100 °C, en particulier pour les argiles (argilites et argiles gonflantes). Une marge de 10 °C, soit une **température maximale admissible de 90 °C**, est adoptée pour prendre en compte les incertitudes sur les propriétés thermiques et les modélisations pour le dimensionnement thermique du stockage, en particulier pour les déchets C et les combustibles usés. Le respect de cette limite exclut ainsi l'ébullition de l'eau liquide et limite les transformations minéralogiques dans les argilites et dans les composants à base d'argile gonflante.
- ✓ Toutefois, le comportement chimique des matériaux cimentaires avec la température étant mal appréhendé au-delà de 70 °C-80 °C, il est retenu une température maximale de 80 °C pour les matériaux cimentaires des alvéoles de déchets B. Une marge de 10 °C est retenue, de sorte qu'une **température maximale admissible de 70 °C**, est adoptée pour le dimensionnement thermique du stockage de déchets B. Plus particulièrement pour les **colis de boues bitumés, on retient une température maximale de 30 °C** afin de limiter le fluage et la réactivité chimique du bitume.

*Effets de la température sur le relâchement et la migration des radionucléides dans le stockage et le Callovo-Oxfordien : l'étanchéité des conteneurages de déchets C et des combustibles usés*

La vitesse de dissolution aqueuse du verre augmente de façon exponentielle avec la température, notamment au-delà de 50 °C. L'absence d'eau sur la matrice verre des déchets vitrifiés, durant la période où la température à cœur des colis est supérieure à 50 °C, permet d'éviter un régime de dissolution initiale du verre trop important. Après la phase transitoire de dissolution initiale, la cinétique de dissolution du verre est contrôlée par les conditions de transport des solutés, la chimie des eaux et les propriétés de rétention de l'environnement extérieur. L'ensemble de ces données est mal appréhendé pour des températures supérieures à 50 °C et des gradients thermiques élevés. Il en va de même pour le comportement des radionucléides en solution, à la fois pour les déchets vitrifiés et combustibles usés.

On retient donc le besoin d'**une étanchéité des conteneurages des déchets C et des combustibles usés tant que la température dans l'environnement proche des colis est supérieure à 50 °C**. Pour les colis primaires de déchets vitrifiés, cette étanchéité est obtenue par la conception d'un surconteneur.

#### 2.4.2.5 Une architecture modulaire et fractionnée du stockage

L'architecture fractionnée et modulaire (compartimentée) permet :

- ✓ d'assurer une grande flexibilité dans la gestion des déchets, l'exploitation et la réversibilité du stockage,
- ✓ de limiter les interactions phénoménologiques entre les différentes catégories de déchets et entre différentes familles de déchets au sein d'une même catégorie, en particulier sur le plan thermique, afin de préserver leurs propriétés de confinement des radionucléides,
- ✓ de limiter les conséquences d'événements altérés nés de la défaillance et de l'intrusion dans le stockage

- **Des zones de stockage dédiées pour les différents déchets**

Le stockage se présente en grand comme un ensemble de zones distinctes, éloignées les unes des autres de plusieurs centaines de mètres : la zone des puits d'accès assurant la liaison avec la surface, et les zones dites « de stockage » dédiées aux déchets (B, C0, C1/C2, C3/C4, CU1, CU2). Un réseau de galeries dites « de liaison » assure la liaison entre les zones de stockage et les puits d'accès (Figure 2.4.2).

Du point de vue de la conception du stockage, on peut distinguer :

- ✓ d'une part, les zones de stockage des déchets B et C0 qui se caractérisent par des *colis non ou faiblement exothermiques*, pouvant être stockés sans période d'entreposage préalable. Par ailleurs, ces zones représentent des emprises horizontales et des volumes de travaux de construction relativement faibles. Le dimensionnement de ces zones et des galeries de liaison permettant de les desservir apparaît peu sensible à la date du début de la mise en stockage, ni aux rythmes de construction et d'exploitation.
- ✓ d'autre part, les zones de stockage des déchets C autres que C0 et des combustibles usés CU1 et CU2, qui se caractérisent par des *colis fortement exothermiques*, nécessitant une durée d'entreposage préalable significative. Ces zones représentent des emprises horizontales et des volumes de travaux de construction élevés. Le dimensionnement de ces zones de stockage et de leurs galeries de liaison est sensible aux dates de début de mise en stockage, ainsi qu'au rythme de construction et d'exploitation.

- **Une modularité et un fractionnement de chaque zone de stockage**

Pour répondre aux besoins de fractionnement, dictés par la sûreté à long terme, et de modularité favorisant la flexibilité et la progressivité de la construction et de l'exploitation du stockage, les zones de stockage sont subdivisées de façon arborescente en *sous zones*, *modules* et *alvéoles* (Figure 2.4.2).

Afin de séparer des déchets ayant des comportements différents pour les colis B, de garantir une flexibilité de construction et d'exploitation pour les colis de déchets C et les colis de combustibles usés, chaque zone de stockage est divisée en 2 à 4 *sous zones* regroupant chacune plusieurs *modules*.

Les *modules* constituent les éléments de base du fractionnement du stockage justifié par la sûreté à long terme. Chaque zone est ainsi divisée en au moins une dizaine de modules<sup>5</sup>. Sur le plan de l'organisation, les modules peuvent être subdivisés en *unités d'exploitation* dans lesquelles ne s'exerce qu'un seul type d'activité (construction, exploitation ou fermeture) pendant une période de plusieurs mois ou années.

---

<sup>5</sup> Pour les zones regroupant un inventaire faible, le nombre de modules peut être inférieur à 10.

Dans la zone B, chaque module est constitué d'une *alvéole* et de sa *galerie d'accès*, et représente une *unité d'exploitation*. Dans les zones des déchets C et des combustibles usés, chaque module est constitué de plusieurs dizaines d'*alvéoles* et de trois *galeries d'accès* à ces alvéoles, et est subdivisé en deux *unités d'exploitation*.

La Figure 2.4.2 illustre l'architecture générale du stockage pour le scénario de production des déchets S1a.

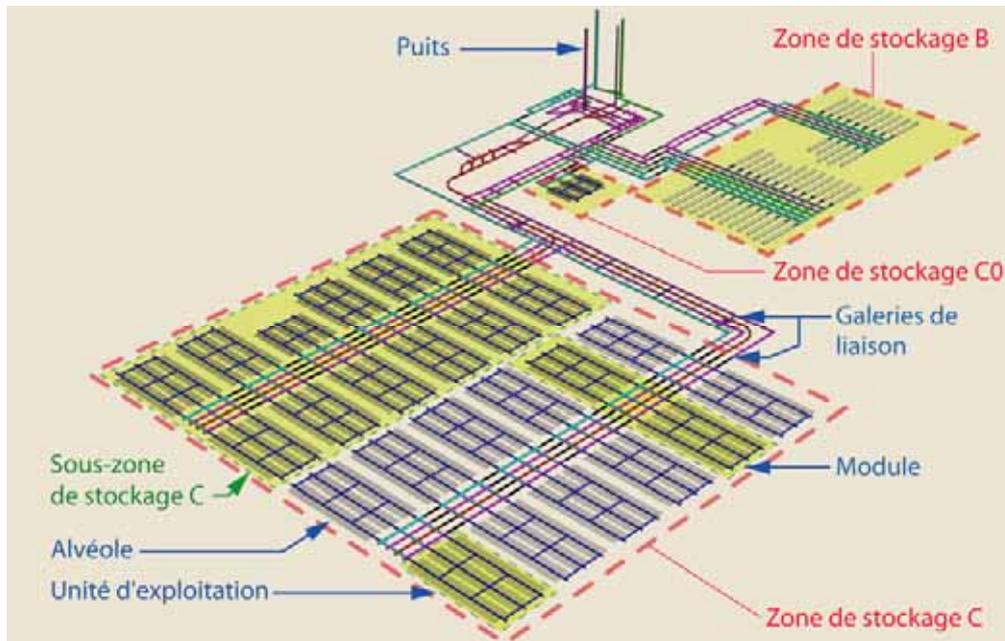


Figure 2.4.2 Exemple d'organisation générale du stockage (cas du scénario de production des déchets S1a)

- **Des alvéoles de déchets B dédiées suivant la présence de composés organiques et/ou la production d'hydrogène**

Les colis B présentant des caractéristiques physico-chimiques variées. Afin d'éviter ou de limiter les interactions phénoménologiques entre colis, la zone de déchets B est subdivisée en deux sous zones :

- la sous zone 1 reçoit les colis ne contenant pas de matière organique,
- la sous zone 2 reçoit les colis contenant de la matière organique.

Dans chaque sous zone, la distance entre alvéoles retenue est de 72 m (5 fois le diamètre de l'ouvrage), de façon à laisser entre deux alvéoles une distance suffisante pour minimiser les interactions mécaniques entre alvéoles.

On notera que la sous zone 1 correspond aussi aux colis B les plus actifs radiologiquement et les plus chauds thermiquement, toute proportion gardée. Cette séparation permet donc également d'éloigner les colis chauds notamment des colis de bitumes de la sous zone 2, qui sont sensibles à la chaleur.

Cette subdivision correspond à trois types d'alvéoles (Tableau 2.3.4) :

*Pour la sous zone 1*

- Les *alvéoles* qui contiennent des déchets ne comportant pas de composés organiques, mais produisant de l'hydrogène par radiolyse du béton des colis primaires.
- Les *alvéoles* qui contiennent des déchets ne comportant pas de composés organiques et ne produisant pas d'hydrogène par radiolyse.

Pour la sous zone 2

- Les **alvéoles** correspondant à des déchets B contenant des composés ou de la matière organique et produisant de l'hydrogène par radiolyse de cette dernière. Il s'agit principalement des déchets bitumés.

Tableau 2.4.1 Répartition des colis types de déchets B par alvéole

Colis types de déchets B regroupés dans des alvéoles distinctes
B3.1.1 – B3.1.3 – B3.2 – B3.3.2 – B4
B1 – B5.2 – B5.3
B2 – B3.1.2 – B3.3.1 – B3.3.3 – B3.3.4 – B5.1

- **Une modularité des zones de stockage des déchets C et des combustibles usés limitant la charge thermique et permettant une flexibilité du stockage**

Les zones de stockage obéissent à une organisation similaire à l'architecture générale du stockage. Leur conception et leur dimensionnement sont très fortement conditionnés par les considérations thermiques. Pour faciliter l'organisation de leur construction, de leur exploitation et de leur fermeture, ces zones sont divisées en sous zones d'une longueur d'environ 2 km et d'une largeur d'environ 1,5 km ; chaque sous zone est elle-même découpée en 8 à 12 unités d'exploitation. Chaque unité d'exploitation regroupe de 80 à 220 alvéoles. L'espacement des alvéoles entre elles est de l'ordre de 15 à 20 mètres, afin de contribuer au respect du critère de température maximale de 90 °C.

- **Un regroupement des puits d'accès**

La liaison entre les installations de surface et les installations souterraines est réalisée par un ensemble de puits communs à l'ensemble des zones de stockage. L'ensemble de puits est compatible avec tous les flux engendrés par les différents scénarios de production des déchets (S1a, S1b, S1c et S2). On distingue 4 puits permettant respectivement le transfert des colis, le retour d'air de ventilation, le transfert de personnel et le transfert des flux de matières liés à la construction, l'exploitation et la fermeture du stockage.

Les puits sont regroupés dans une même zone d'environ 200 m de rayon, excentrée par rapport aux zones de stockage. La zone des puits d'accès peut être située en amont du gradient de charge hydraulique dans l'Oxfordien carbonaté par rapport aux zones de stockage (cf. § 1.1).

Le diamètre utile des puits varie de 6,5 m pour le puits de personnel à environ 10 m à 11,5 m pour les autres puits. Les puits sont rendus étanches au passage des Calcaires du Barrois par une paroi moulée. Dans la couche du Callovo-Oxfordien, les puits présentent un soutènement / revêtement en béton dont l'épaisseur est de l'ordre de 1,7 m.

- **Un faisceau de galeries de liaison**

Les modules de stockage sont reliés aux puits par les *infrastructures de liaison*, constituées de faisceaux de *galeries de liaison* parallèles. Cet ensemble est hiérarchisé en *galeries de liaison principales*, qui relie la zone des puits aux différentes sous zones du stockage et en *galeries de liaison secondaires*, à l'intérieur de chaque sous zone. Cette hiérarchisation facilite la souplesse de construction et d'exploitation du stockage en rendant indépendantes les différentes sous zones.

Le diamètre des galeries a été volontairement limité à une section aussi faible que possible, compte tenu des flux traversant ces galeries. Le diamètre utile des galeries de liaison est de 5,65 mètres, avec une section en fer à cheval.

Les galeries sont soutenues et revêtues respectivement par du béton projeté d'épaisseur 20 cm et un béton B60 d'épaisseur 35 cm ou 65 cm suivant l'orientation des galeries par rapport aux contraintes mécaniques naturelles.

#### 2.4.2.6 Des conteneurages et des colis de stockage dédiés aux différents déchets

Les colis primaires de déchets B et C, ainsi que les assemblages de combustibles usés ne sont pas mis en stockage en l'état. Ils sont conditionnés dans des colis dits « de stockage » qui sont eux mis en place dans les alvéoles de stockage (Andra, 2005i).

- **Les colis de stockage en béton des déchets B**

Les colis primaires de déchets B sont regroupés par colis type dans des conteneurs en béton, afin de minimiser les flux manutentionnés et de faciliter la standardisation de l'exploitation (Figure 2.4.3). Ils sont constitués d'une enveloppe et d'un couvercle.

Différents types de conteneurs sont possibles pour tenir compte des spécificités des colis types. C'est ainsi que pour les colis types produisant de l'hydrogène, par exemple les colis de boues bitumées, les couvercles sont conçus de manière à permettre une évacuation de l'hydrogène produit.

L'ensemble du conteneur en béton, des colis primaires de déchets B et du matériau de remplissage constitue les colis de stockage de déchets B. Les colis de stockage sont mis en place par empilement dans les alvéoles de stockage.

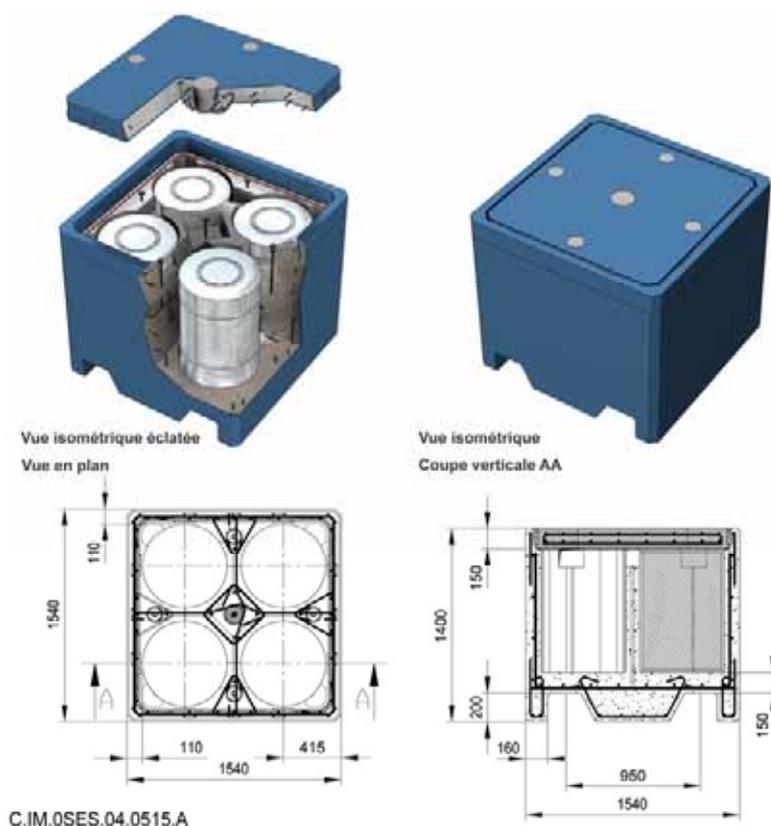


Figure 2.4.3 Schéma d'un colis de stockage de déchets B

- **Un surconteneur épais en acier noir pour les colis primaires de déchets C et un conteneur épais en acier noir pour les combustibles usés**

Chaque colis primaire de déchets C est disposé dans une enveloppe (appelé aussi surconteneur) en acier non allié de 55 mm d'épaisseur. Cette enveloppe est constituée de deux parties soudées l'une à l'autre : un corps constitué d'une enveloppe cylindrique avec fond intégré et un couvercle (Figure 2.4.4).

Les assemblages de combustibles usés sont conditionnés dans une enveloppe en acier non allié composée d'une virole cylindrique d'environ 110 mm d'épaisseur et d'un couvercle soudé. Les assemblages de type CU1 sont groupés par quatre, séparés au sein du conteneur par un insert en fonte ; ils sont éventuellement preconditionnés dans un étui en acier inoxydable. Les colis de stockage CU2 ne comportent qu'un seul assemblage (Figure 2.4.5).

Ces conteneurages épais en acier noir permettent la manutention et le retrait éventuel des colis dans le cadre de la réversibilité. Par leur tenue mécanique et leur lente corrosion, ils garantissent une étanchéité sur une durée d'ordre millénaire (4 000 ans) pour les déchets vitrifiés et de 10 000 ans pour les combustibles usés.



Figure 2.4.4 Schéma d'un colis de stockage de déchets C



C.IM.ASTE.05.0114.A

Figure 2.4.5 Schéma d'un colis de stockage de combustibles usés CUI

Dans les alvéoles de stockage, les colis de stockage de déchets C et les colis de combustibles usés sont disposés à l'horizontal dans un chemisage métallique (cf. § 2.4.2.7). Des intercalaires similaires aux colis de stockage et remplis par un matériau inerte sont disposés entre les colis de stockage, afin de contribuer à limiter la température dans les alvéoles en deçà de 90 °C (Figure 2.4.8, Figure 2.4.9). Le nombre de colis de stockage varie ainsi de 6 à 18 pour les alvéoles de déchets C. Il est de 3 ou 4 pour les alvéoles de combustibles usés.

- **Une diminution des débits de dose externes avec les colis de stockage**

Les enveloppes des colis de stockage contribuent à diminuer les débits de dose externes dus aux rayonnements  $\beta\gamma$  émis par les déchets (cf. § 2.3.4.7). C'est particulièrement le cas pour les déchets C et les combustibles usés, grâce à l'épaisseur de leur conteneur métallique, comme le souligne le Tableau 2.4.2.

Tableau 2.4.2 Ordres de grandeur des débits de dose au contact des colis de stockage au moment de leur mise en stockage

Type de déchets	Type de colis de stockage	Nature de l'enveloppe du colis de stockage	Débit de dose maximum au contact du colis de stockage ( $Sv.h^{-1}$ )
<b>B</b>	B1, B5	Béton	$\leq 10$
	B2	Béton	$\leq 1$
	B3, B4	Béton	$\leq 1$
<b>C</b>	C	Acier non allié	$\leq 10$
<b>CU</b>	CU1	Acier non allié	$\leq 0,1$
	CU2	Acier non allié	$\leq 0,01$

### 2.4.2.7 Des alvéoles de stockage spécifiques pour chaque déchet (Andra, 2005i)

- **Les tunnels en béton pour les déchets B**

L'alvéole de stockage retenue est un tunnel borgne subhorizontal d'un diamètre excavé compris entre 10 et 12 mètres environ et d'une longueur utile de 250 mètres. Il est revêtu de béton et comporte une dalle de roulement en béton. L'alvéole constitue une chambre irradiante dans laquelle les colis sont empilés. Pour ce faire, un volume de béton supplémentaire est rajouté au revêtement, de façon à constituer une chambre de stockage de section rectangulaire et de dimension adaptée à la forme de l'empilement des colis. Les jeux décimétriques laissés entre les colis (soit un taux de vide entre colis inférieur à 5 %, ramené à la section excavée) permettent le retrait aisé éventuel des colis, dans le cadre de la réversibilité.

L'alvéole est ventilée pendant toute sa durée d'exploitation pour évacuer les gaz produits par les colis et contribuer également à diminuer la température dans les premières années du stockage des colis. Elle est reliée à l'infrastructure d'accès par une galerie d'entrée de diamètre excavé compris entre 7 et 8 m. Cette galerie est scellée au moment de la fermeture de l'alvéole.

Le concept d'alvéole de déchets B est illustré par le schéma de la Figure 2.4.6.

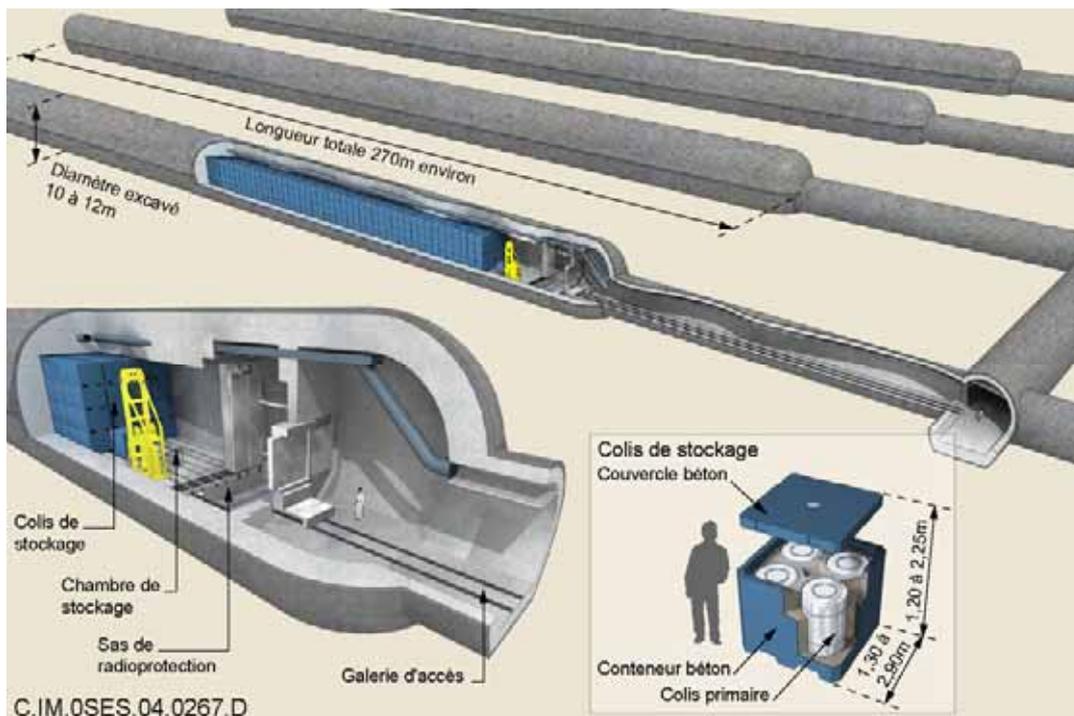


Figure 2.4.6 Schéma de principe d'une alvéole de stockage de colis de déchets B en configuration d'exploitation

- **Les tunnels de petit diamètre pour les déchets C et les combustibles usés**

Les alvéoles de stockage des colis de déchets C et des colis de combustibles usés sont des tunnels borgnes subhorizontaux de l'ordre de 40 m de longueur, comprenant une « partie utile » destinée au stockage des colis et une tête d'alvéole destinée au scellement de l'alvéole. Ils sont réalisés et exploités à partir des galeries d'accès. Chaque tunnel comporte un chemisage interne qui est un tube épais en acier non ou faiblement allié dans lequel sont introduits les colis de stockage. Ce chemisage dont l'épaisseur varie entre 25 mm (déchet C et combustibles usés CU2) et 40 mm (combustibles usés CU1) permet le retrait éventuel des colis dans le cadre de la réversibilité.

Le concept d'alvéole de déchets C retenu est un tunnel au diamètre du colis de stockage, environ 0,7 m, le chemisage interne en acier servant alors de soutènement (Figure 2.4.7 et Figure 2.4.8). Le tunnel de colis de combustibles usés a un diamètre plus important, d'environ 3,3 m pour les CU1 et d'environ 2,6 m pour les CU2. Il est soutenu par un revêtement constitué d'un tube épais en acier non ou faiblement allié et perforé. L'espace compris entre la paroi des argilites et le chemisage interne est rempli d'un matériau à base d'argile gonflante mis en place sous forme d'anneaux et réalisant une « barrière ouvragée » (Figure 2.4.9).

La chaleur produite par les déchets C et les combustibles usés est évacuée uniquement par conduction passive dans l'environnement géologique. Aucune ventilation n'est sollicitée pour ce processus. Les alvéoles sont fermées par un bouchon d'exploitation (capot d'étanchéité) qui empêche un échange d'air entre les alvéoles et les galeries d'accès.

Les concepts d'alvéole de déchets C et d'alvéole de combustibles usés sont illustrés sur les schémas des Figure 2.4.7, Figure 2.4.8 et Figure 2.4.9.

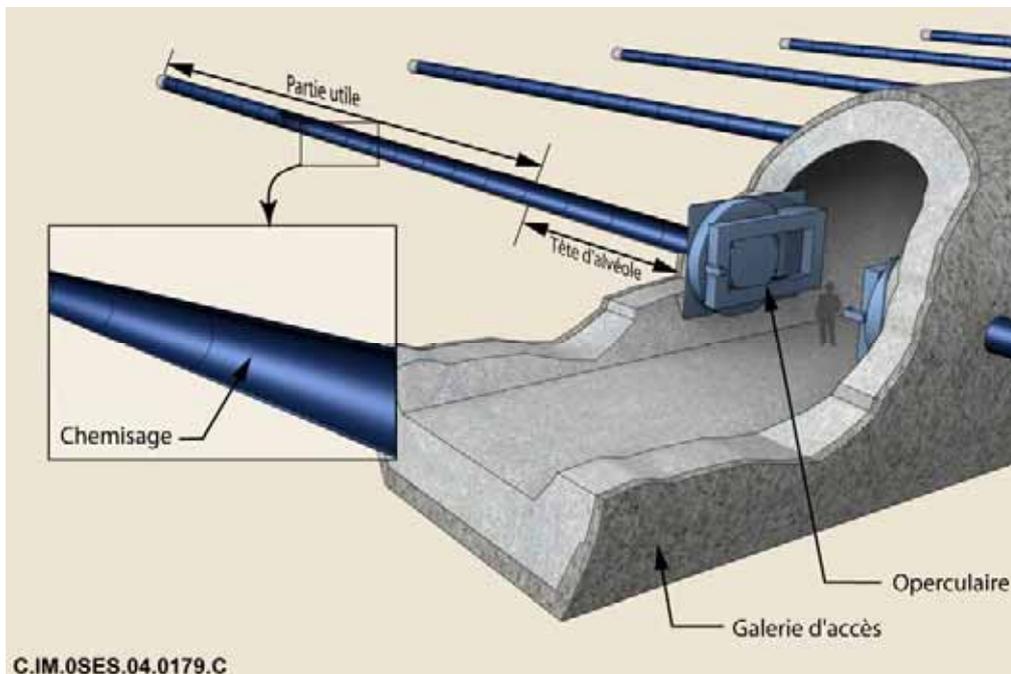


Figure 2.4.7 Schéma de principe d'une alvéole de stockage de colis de déchets C en configuration d'exploitation

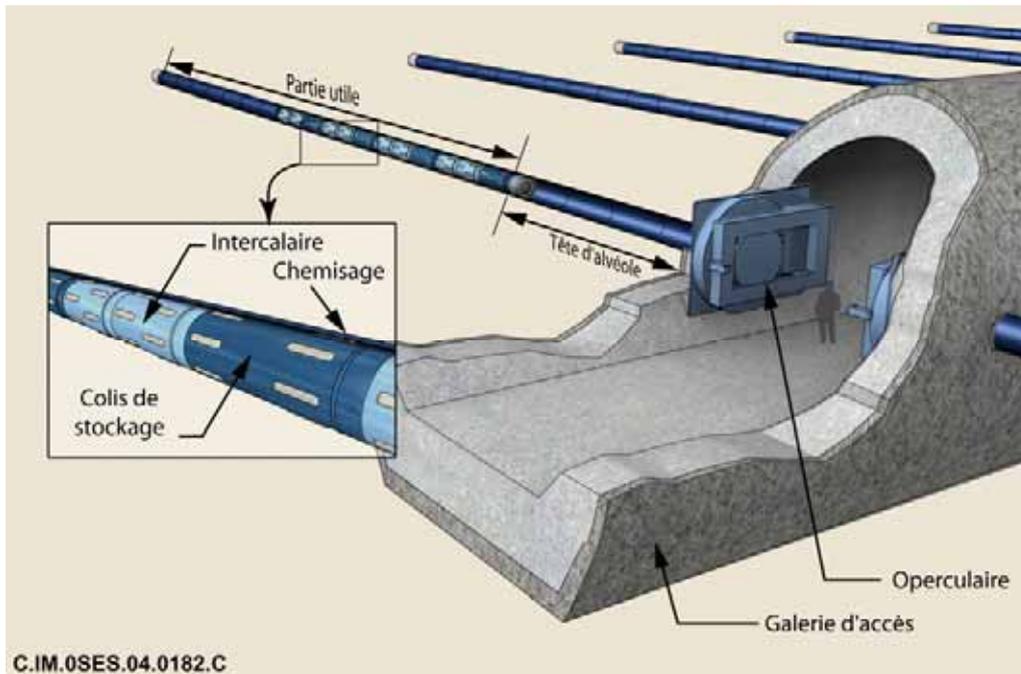


Figure 2.4.8 Schéma de principe d'une alvéole de stockage de déchets C remplie de colis de stockage et en configuration d'exploitation

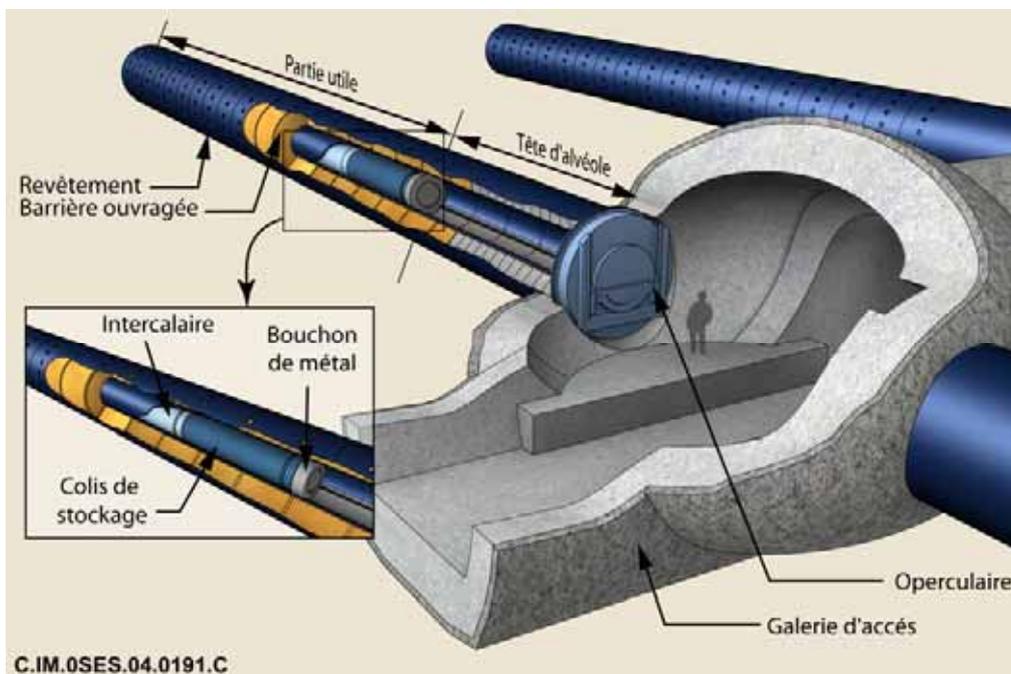


Figure 2.4.9 Schéma de principe d'une alvéole de stockage de combustibles usés remplie de colis de stockage et en configuration d'exploitation

#### 2.4.2.8 Une gestion du stockage par étapes jusqu'à sa fermeture

- **Un schéma général progressif et flexible**

Afin d'assurer la flexibilité et la réversibilité du stockage, sa construction, son exploitation et sa fermeture reposent sur un principe d'étapes successives. Il s'applique depuis l'échelle générale du stockage (puits d'accès et zones de stockage) jusqu'à l'échelle des modules et des alvéoles de stockage au sein d'une zone de stockage. Il peut être résumé comme suit.

**Etape 1** : les colis de stockage sont mis en place dans une alvéole. L'alvéole est obturée par un dispositif pouvant être ouvert pour permettre l'introduction de colis, puis refermée provisoirement, pour isoler l'alvéole de la galerie d'accès qui la dessert et qui est accessible.

**Etape 2** : Cette étape se caractérise par le scellement de l'alvéole. La galerie desservant l'alvéole (ou un groupe d'alvéoles) reste encore accessible.

**Etape 3** : le module est scellé et se trouve alors dans sa configuration finale. Les galeries de liaison desservant ce module sont encore accessibles. La fermeture du module comprend le remblayage des galeries d'accès internes au module.

**Etape 4** : les galeries de liaison entre un ou plusieurs modules sont à leur tour scellées. Seules les galeries de liaison avec la zone de stockage considérée sont accessibles.

**Etape 5** : les ouvrages de liaison entre la surface et les installations souterraines sont scellés. L'ensemble des modules et zones de stockage desservis par ces ouvrages se trouve alors en configuration "post-fermeture".

- **Un chronogramme flexible pour la réalisation, l'exploitation et la fermeture du stockage**

La progressivité de la production des colis de déchets et de leur mise en place dans le stockage, et le principe d'une gestion flexible conduisent à ce que l'ensemble des différentes étapes de réalisation, d'exploitation et de fermeture du stockage se développe sur une durée totale d'ordre séculaire à pluriséculaire. Dans le détail, cette durée peut varier suivant le scénario de production des déchets (*i.e.* scénario de gestion des combustibles nucléaires) ainsi que les choix de durée de passage d'une étape à une autre. Par convention, une durée d'ordre séculaire est retenue en référence.

La conception du stockage en zones distinctes pour les déchets (B, C0, C1/C2/C3/C4, CU1, CU2 et CU3) autorise *de facto* une grande flexibilité pour les chronogrammes de réalisation, d'exploitation et de fermeture de chacune de ces zones. Toutefois, comme nous le verrons dans les chapitres 5, 6, 7, 8 9 et 10 avec la description de l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique, la modularité du stockage conduit aussi à des évolutions phénoménologiques quasi indépendantes entre chaque zone et similaires entre modules d'une même zone, ce qui minimise l'incidence des chronogrammes sur ces évolutions.

Pour mener l'analyse de l'évolution phénoménologique, on retient un chronogramme conventionnel de référence de durée séculaire. Il correspond à une gestion progressive des déchets au regard de leur thermicité, et couvre l'ensemble des déchets:

- ✓ d'abord la mise en place des colis de déchets non ou peu exothermiques qui ne nécessitent pas un entreposage préalable, les déchets B et les colis types de déchets vitrifiés C0, sur une période de l'ordre de 40 ans environ,
- ✓ puis celle des déchets vitrifiés C1, C2, C3 et C4 sur une période de 50 ans pour les scénarios S1a et S1b, inférieure pour S2,

- ✓ et enfin celle des combustibles usés sur une période 30 ans environ (pour le scénario S2), avant la fermeture définitive du stockage.

En sensibilité, l'analyse est conduite sur une durée pluriséculaire du chronogramme de construction, d'exploitation et de fermeture du stockage.

#### 2.4.2.9 Une fermeture progressive et structurée du stockage

##### ● La mise en place de composants spécifiques du stockage

La fermeture du stockage consiste à réaliser des ouvrages dont la fonction est de limiter à long terme les déformations mécaniques des argilites autour du stockage, de limiter les circulations d'eau et de fractionner le stockage.

Ces fonctions sont confiées à différents types d'ouvrages : la limitation des déformations mécaniques des argilites repose essentiellement sur un soutènement ou un remblayage de l'ensemble des galeries. La limitation des écoulements d'eau repose sur des scellements, ouvrages localisés de faible perméabilité. Différents scellements sont implantés à des emplacements favorisant leur efficacité et leur redondance. Ils assurent ainsi le fractionnement du stockage.

La fermeture du stockage s'inscrit dans le cadre du processus de stockage par étapes, chaque type d'ouvrage pouvant marquer une étape de ce processus, comme résumé ci-dessous :

- la mise en place des bouchons d'argile gonflante en tête des alvéoles de stockage de déchets C et des alvéoles de combustibles usés,
- la mise en place de scellements dans les galeries d'accès des alvéoles de déchets B,
- le remblayage des galeries,
- la mise en place de scellements en des points particuliers des galeries des zones de stockage,
- le scellement des puits d'accès.

##### ● Les bouchons des alvéoles de stockage de déchets C et de combustibles usés

La fermeture des alvéoles de déchets C consiste au retrait du chemisage en tête d'alvéole et à la mise en place d'un bouchon d'argile gonflante et d'un bouchon de béton non armé (Figure 2.4.10).

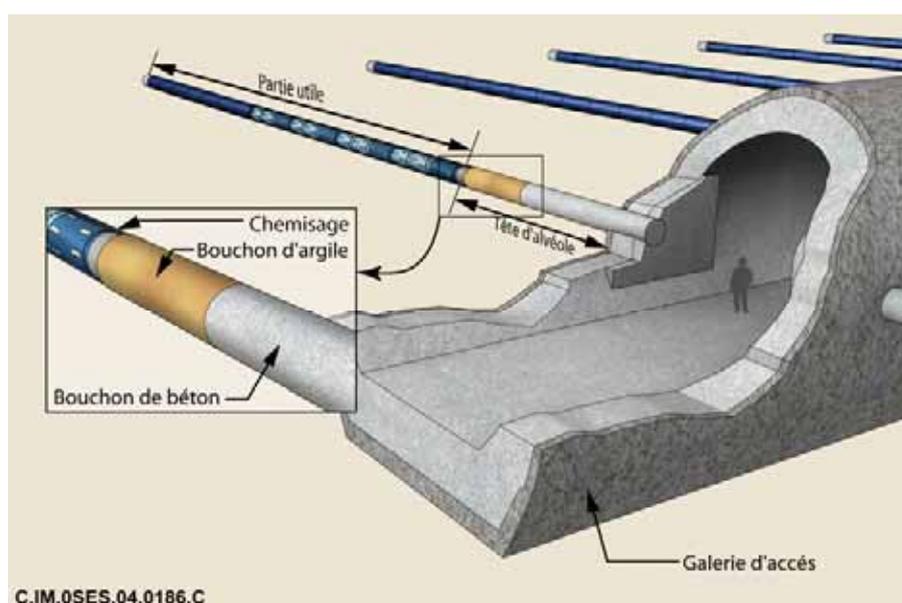


Figure 2.4.10 Schéma de principe d'une alvéole de stockage de déchets C scellée

Pour les alvéoles de combustibles usés, le principe de fermeture est identique à celui des alvéoles de déchets C, mais le soutènement métallique est laissé en place en tête d'alvéole (Figure 2.4.11).

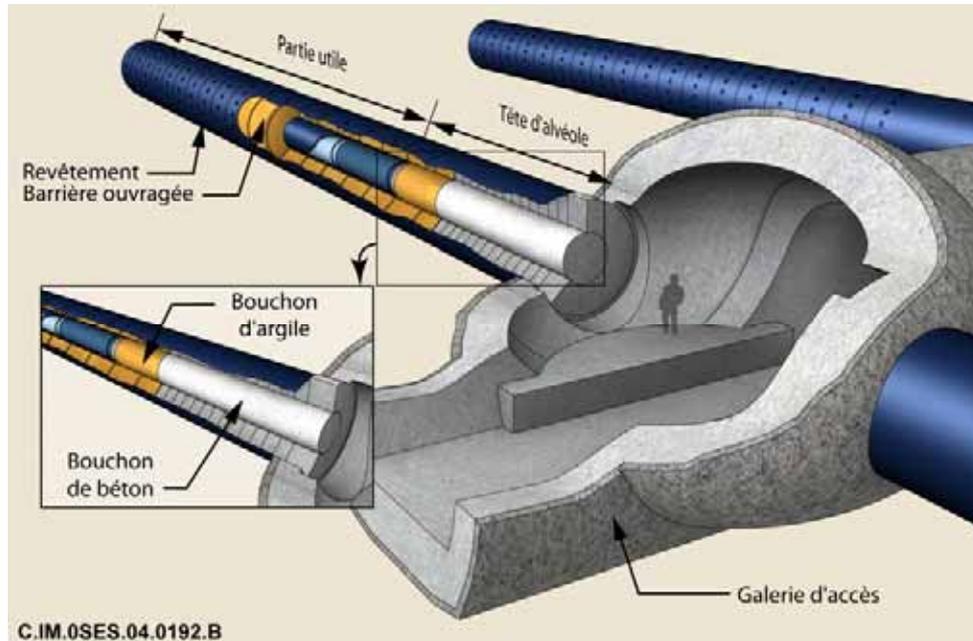


Figure 2.4.11 Schéma de principe d'une alvéole de stockage de colis de combustibles usés scellée

### ● Les scellements de galeries et d'alvéoles de déchets B

Chaque scellement de galerie est constitué d'un noyau à base d'argile gonflante, conférant à l'ouvrage sa très faible perméabilité, et de massifs d'appui en béton, assurant un confinement mécanique du noyau. De part et d'autre, sur vingt à trente mètres environ, le remblai de la galerie est doté de propriétés mécaniques renforcées par rapport au remblai courant, pour contribuer au confinement mécanique de l'ouvrage (Figure 2.4.12).

Les noyaux d'argile gonflante ont des longueurs de l'ordre de 40 mètres. Ils présentent localement des saignées d'une épaisseur de 30 centimètres environ et d'une profondeur de 1,5 à 3,0 m qui assurent la coupure hydraulique de la zone fracturée des argilites, tandis que le revêtement en béton des galeries est maintenu en place ailleurs le long du noyau.

L'argile gonflante est retenue comme matériau de base du noyau et des saignées pour sa très faible perméabilité et sa capacité de gonflement et de déformation qui lui permet, en présence d'eau, de combler les jeux laissés lors de la construction du noyau et d'assurer un bon contact avec la paroi de la galerie ; ainsi, après gonflement de l'argile, le noyau n'offre pas à l'eau un chemin significatif d'écoulement. Enfin, son caractère naturel et sa compatibilité chimique avec les argilites constituent des gages de grande durabilité. Deux techniques de mise en œuvre du noyau en argile gonflante sont envisagées : les « pellets » (ou mélange de pellets et de poudre) et les blocs précompactés.

Les massifs d'appui en béton type BHP non armé ont pour objet de limiter l'expansion volumique du noyau, en résistant mécaniquement à la pression de gonflement développée par l'argile gonflante, en particulier pendant la phase transitoire d'hydratation et de gonflement du noyau. À très long terme les remblais d'appui doivent relayer le cas échéant le rôle des massifs en béton. Pour ce faire, ils sont constitués d'un mélange, en proportions voisines, d'argilites excavées et de sable.

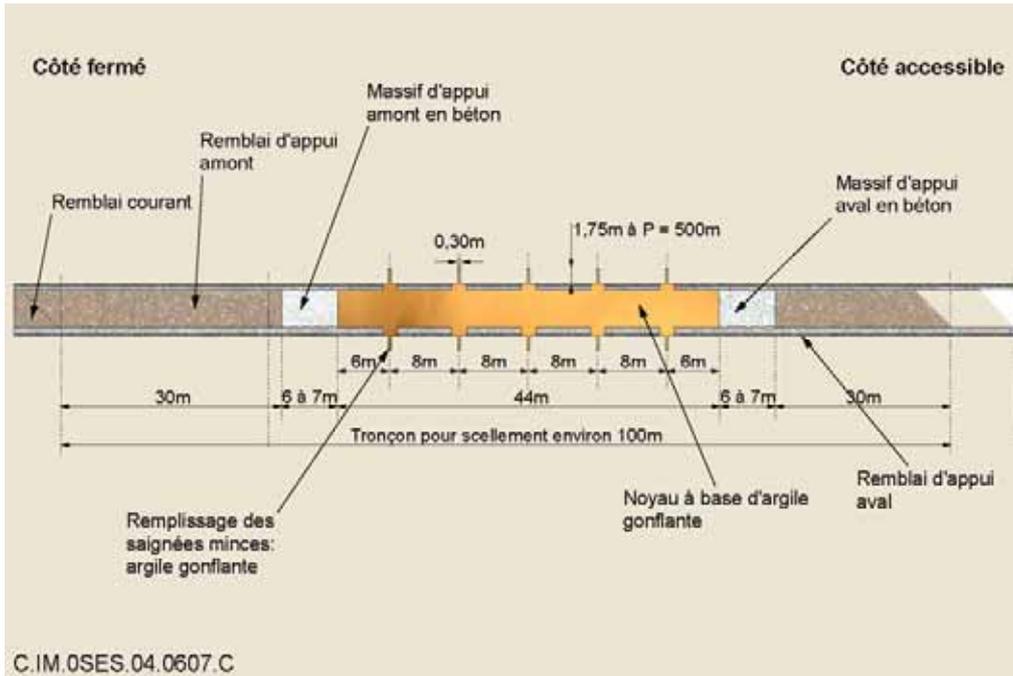


Figure 2.4.12 Schéma de principe d'un scellement de galeries : coupe longitudinale

La galerie d'accès des alvéoles de stockage de déchets B est analogue à une galerie. Les scellements des alvéoles de stockage de déchets B sont similaires à ceux des galeries et leurs dimensions sont adaptées à la configuration particulière des alvéoles (Figure 2.4.13 et Figure 2.4.14).

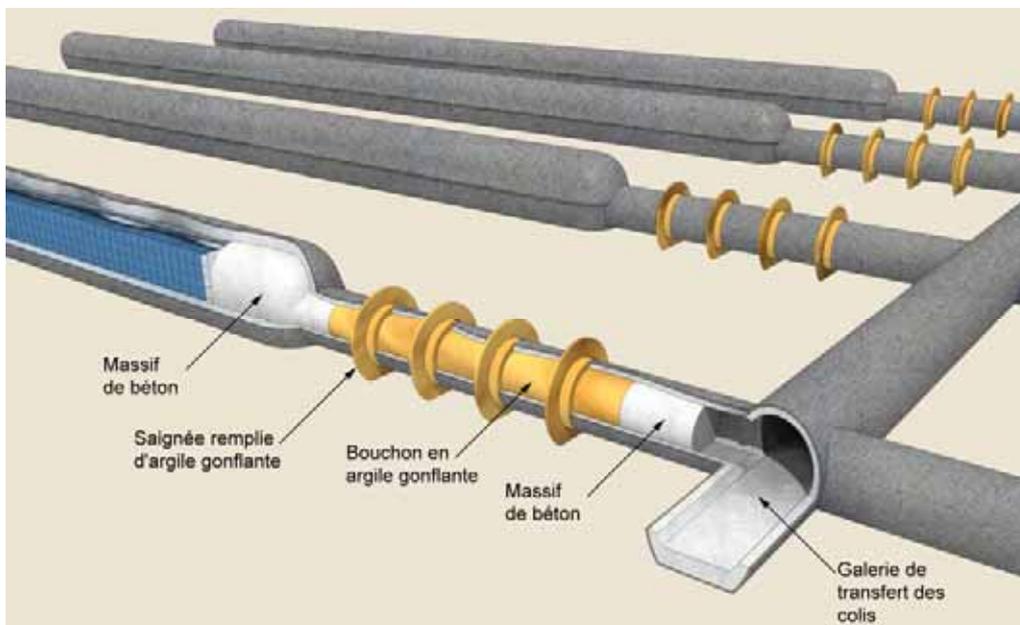


Figure 2.4.13 Schéma de principe d'une alvéole de déchets B scellée : vue 3D

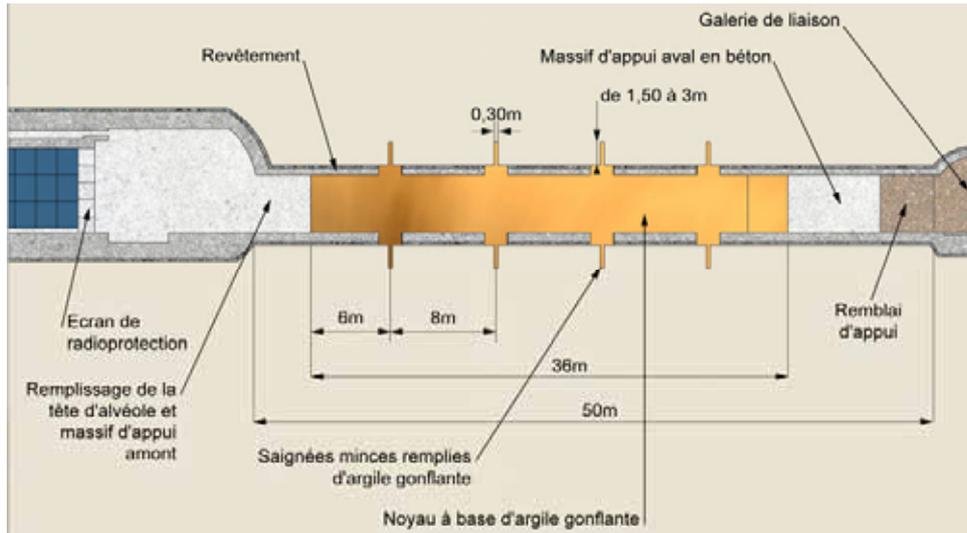


Figure 2.4.14 Schéma de principe d'un scellement d'alvéole de déchets B : coupe longitudinale

### ● Le remblai de galeries

Le remblai doit reprendre la pression des argilites après la rupture du revêtement des galeries et limiter les déformations de la roche à long terme, de façon à éviter ou limiter une extension de la zone endommagée autour des ouvrages. Pour ce faire, **(i)** les vides de mise en place doivent être aussi limités que possible, et **(ii)** le matériau du remblai doit avoir une « portance » suffisante, dès sa mise en place. La raideur du matériau augmente ensuite avec la compression opérée par les argilites avec leur fluage.

Le volume de remblai à mobiliser étant important (plusieurs millions de mètres cubes), il a été retenu le principe d'un réemploi des argilites excavées comme matériau de base du remblai, afin de limiter les besoins en termes de matériaux d'apport.

Le remblai est constitué des argilites excavées, reconditionnées après stockage en verse, par broyage à 20 millimètres. Sa teneur en eau est proche de celle de l'optimum Proctor normal (OPN)<sup>6</sup>, soit 10 à 15 %. Une densité sèche du remblai à la mise en place d'au moins 1,6 est visée, avec un potentiel de gonflement de un à quelques pourcents. La mise en place se ferait par damage en couches horizontales en partie basse de galerie, en couches inclinées en couronne.

Au voisinage des scellements, le remblai assure de plus un rôle de confinement mécanique (Figure 2.4.12).

### ● Les scellements de puits

Le scellement des puits est composé d'un « *scellement isolant le stockage* » établi *en partie supérieure de la couche du Callovo-Oxfordien*, afin d'isoler le stockage des formations géologiques sus-jacentes. Sa perméabilité vise à être aussi faible possible. Comme pour les galeries, le **noyau** de ce scellement est à base d'argile gonflante. Il repose sur un **massif d'appui en béton** occupant la base du puits, la recette, et s'étendant sur une longueur pluridécimétrique dans les galeries qui s'y raccordent. La robustesse mécanique de ce massif assure la stabilité de l'ensemble des ouvrages de fermeture superposés dans le puits. Le poids des matériaux sus-jacents peut contribuer à terme au confinement

<sup>6</sup> L'OPN, optimum Proctor normal, est un essai normalisé qui détermine la teneur en eau d'un matériau la plus favorable à son compactage. Une teneur en eau légèrement supérieure à celle l'OPN favorise la tenue mécanique du remblai lors de la saturation.

du noyau gonflant ; un massif d'appui en béton ancré dans la roche est construit au-dessus du noyau pour jouer un rôle mécanique durant la phase de resaturation.

Le scellement isolant le stockage est établi sur la plus grande hauteur possible, en partie supérieure du Callovo-Oxfordien. Dans cette partie, les argilites sont mécaniquement plus résistantes qu'au niveau médian de la formation. L'épaisseur de ces niveaux plus résistants est d'au moins une trentaine de mètres (38 m au droit du laboratoire souterrain). Les connaissances acquises conduisent à prévoir que la réalisation des puits n'y provoquera pas l'apparition de zone fracturée. Il est ainsi envisagé de déposer le revêtement lors de la réalisation du scellement, sur toute la hauteur du noyau ; le matériau gonflant est ainsi au contact direct des argilites.

Le scellement isolant le stockage est surmonté d'un **remblai**, jusqu'au sommet de l'Oxfordien carbonaté. Le matériau utilisé est identique à celui du remblayage des galeries. Au-dessus du remblai est construit un **scellement de séparation des aquifères** séparant les niveaux plus perméables des formations de couverture : l'Oxfordien carbonaté, le Kimméridgien et le Tithonien. Il pourra par exemple se situer dans le niveau marneux inférieur du Kimméridgien, avec une hauteur de 10 à 15 mètres ; sa constitution est similaire à celle du premier scellement. En partie supérieure du puits, un remblai complète le remplissage jusqu'en surface.

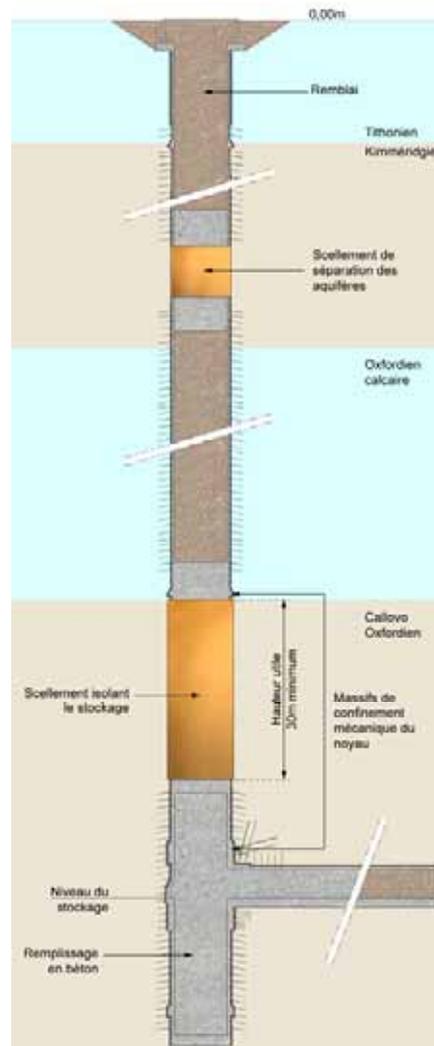


Figure 2.4.15 Schéma de principe d'un scellement de puits d'accès : coupe longitudinale

## **2.5 Implications de l'architecture des ouvrages du stockage sur l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique**

La conception proposée du stockage vise à répondre aux objectifs de sûreté et de réversibilité (Andra, 2005j). Pour ce faire, elle s'appuie sur la connaissance du comportement phénoménologique du stockage et de son environnement géologique. Elle contribue aussi à maîtriser ce comportement, notamment la complexité et les extensions des processus dans le temps et dans l'espace.

### **2.5.1 Une simplification et une maîtrise de l'évolution phénoménologique**

La simplification et la maîtrise de l'évolution phénoménologique du stockage sont des principes retenus pour la sûreté du stockage et la réversibilité. Plusieurs dispositions de conception y concourent.

- ✓ L'architecture compartimentée et modulaire du stockage par zones de stockage de colis types distinctes et éloignées les unes des autres, puis par modules distincts et éloignés les uns des autres au sein d'une même zone de stockage.

Il s'agit de limiter ou d'empêcher toute interaction phénoménologique entre zones de stockage et entre modules d'une même zone, et donc *de facto* la complexité de leurs évolutions phénoménologiques. Le stockage se comporte alors comme une somme de stockages élémentaires quasi indépendants sur le plan de l'évolution phénoménologique.

- ✓ La limitation des températures maximales dans le stockage et dans son environnement géologique.

L'objectif premier est de maintenir le stockage et son environnement géologique dans un domaine de température préservant les propriétés naturelles de la couche du Callovo-Oxfordien et celles des composants du stockage.

- ✓ Le choix des matériaux constitutifs des ouvrages du stockage.

Il s'agit de limiter les perturbations chimiques au sein du stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien et de maintenir un environnement physico-chimique favorable aux colis de déchets afin de limiter le relâchement des radionucléides.

- ✓ Le dimensionnement mécanique des ouvrages souterrains.

Il s'agit de limiter les perturbations mécaniques, notamment l'endommagement mécanique des argilites en champ proche des ouvrages (mise en place d'un revêtement, distance entre deux ouvrages adjacents d'au moins cinq fois le diamètre, minimisation des vides, orientation des alvéoles suivant la direction de la contrainte majeure, etc.).

### **2.5.2 Des ouvrages à la typologie marquée vis-à-vis des comportements phénoménologiques**

La nature des composants du stockage et les modalités d'exploitation du stockage déterminent la phénoménologie mise en jeu dans le stockage et dans le milieu géologique environnant, aussi bien en période d'exploitation / réversibilité qu'en période de post-fermeture. On peut ainsi dégager trois caractéristiques majeures des ouvrages du stockage, qui peuvent par ailleurs se combiner.

### **2.5.2.1 Des ouvrages distincts en terme de matériaux constitutifs**

On distingue :

- ✓ des ouvrages à dominante argile et métaux, comme les alvéoles de colis de déchets C et les alvéoles de colis de combustibles usés (Encadré 2.6, Encadré 2.7 et Encadré 2.9) ;
- ✓ des ouvrages à dominante majoritaire béton (et métaux), comme les alvéoles de déchets B (Encadré 2.8) et des ouvrages à dominante majoritaire argile associée à du béton, comme les scellements et les remblais.

La corrosion et corrélativement la production d'hydrogène sont des processus importants de l'évolution phénoménologique des premiers ouvrages. Les seconds sont marqués par la dégradation chimique des bétons et les interactions chimiques entre les eaux cimentaires et les argiles (argilites et argiles gonflantes).

### **2.5.2.2 Des ouvrages distincts en terme de ventilation pendant l'exploitation**

Comme pour la nature des ouvrages, on distingue :

- ✓ des ouvrages fermés, en terme d'échange d'air avec la galerie, du fait de la mise en place de disposition temporaire (capot d'étanchéité), comme les alvéoles de déchets C et de combustibles usés ;
- ✓ des ouvrages maintenus ouverts et ventilés tout ou partie de la période d'exploitation du stockage jusqu'à sa fermeture, comme les alvéoles des déchets B et surtout les galeries et les puits d'accès.

La ventilation, et plus particulièrement la présence d'oxygène, conditionne les conditions redox au sein des ouvrages, et l'état de saturation de ces ouvrages. Ces deux paramètres ont des effets importants sur les processus chimiques et mécaniques au sein des ouvrages, comme par exemple la corrosion des composants métalliques ou la dégradation chimique des bétons.

### **2.5.2.3 Des ouvrages distincts en terme de dégagement de chaleur**

On distingue :

- ✓ des ouvrages à forte thermicité, comme les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés ;
- ✓ des ouvrages à faible thermicité ou à thermicité nulle, comme les galeries, les puits d'accès et les alvéoles de stockage de déchets B.

La température est un paramètre des processus chimiques, hydrauliques et mécaniques. Bien que la conception vise à limiter les élévations de température au sein du stockage, l'amplitude, la cinétique, et la durée des élévations de température sont des données de l'évolution phénoménologique du stockage.

### 2.5.3 Des composants majeurs du milieu géologique et du stockage

Dans la conception du système de stockage et l'évaluation de sûreté, certains éléments se voient allouer des fonctions. D'autres comme les galeries ou les formations encaissantes, ne jouent pas de rôle explicite bien qu'elles soient représentées (Andra, 2005j).

Ainsi, en post-fermeture, la sûreté du stockage repose sur un ensemble de composants naturels et artificiels privilégiés visant à retarder et à limiter le retour des radioéléments vers l'homme et l'environnement :

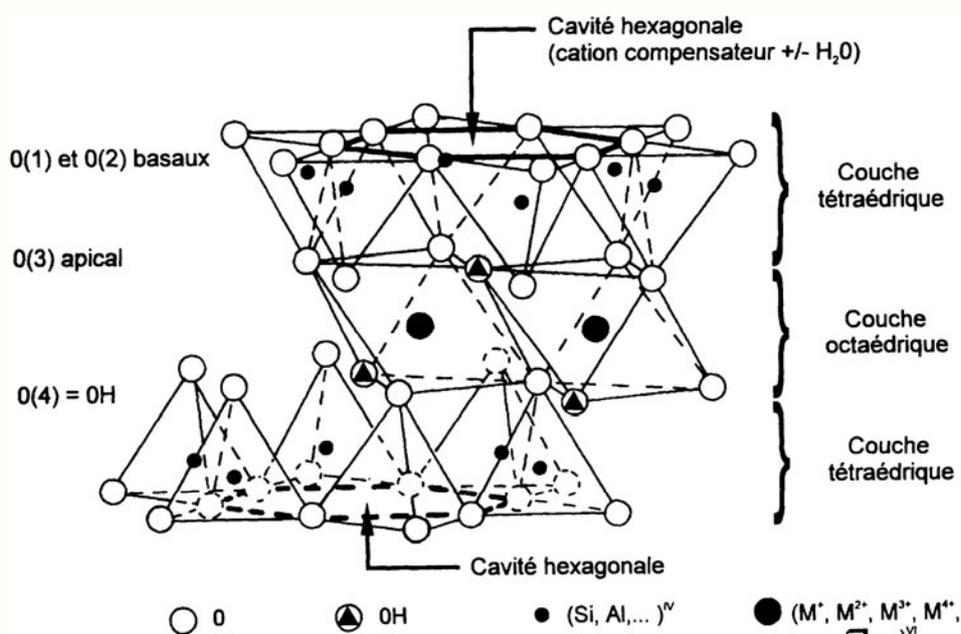
- ✓ la **couche du Callovo-Oxfordien**, du fait notamment de sa stabilité passée sur plusieurs millions d'années et future, ainsi que de sa faible perméabilité et de ses propriétés de rétention élevée ;
- ✓ les **scellements**, qui assurent la fermeture hydraulique générale du stockage ;
- ✓ la **barrière ouvragée en argile gonflante des alvéoles de combustibles usés et les bouchons en argile gonflante des alvéoles de déchets C et de combustibles usés**. Comme les scellements, ils contribuent à la fermeture hydraulique du stockage au niveau des alvéoles ;
- ✓ les **conteneurages de combustibles usés et des déchets C**. Ils ont pour fonction d'assurer un confinement total des radionucléides pendant les périodes au cours desquelles (i) les radionucléides à vie courte et moyenne ont encore une activité significative et (ii) l'élévation de température dans et autour du stockage est encore importante, par exemple supérieure à 50 °C pour les verres ;
- ✓ les **conteneurs de stockage des colis de déchets B**, qui assurent un retard et une limitation du relâchement des radionucléides sur une période *a minima* de quelques milliers d'années à la dizaine de milliers d'années ;
- ✓ les **matrices de conditionnement des déchets**, comme la matrice vireuse, les pastilles d'oxyde des combustibles usés ou la matrice bitume des boues de retraitement. Après la perte de confinement des conteneurages, les matrices de conditionnement limitent le relâchement des radionucléides sur de longues périodes (*a minima* de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers d'années).

### Encadré 2.6 Les argiles gonflantes (Andra, 2005f, Tome 1)

#### Les minéraux argileux gonflants

Les argiles gonflantes sont constituées majoritairement en masse par des minéraux argileux dits gonflants, les *smectites*, et par des minéraux dits secondaires ou accessoires (carbonates, quartz, feldspaths, pyrite, oxy-hydroxides). Les smectites, comme les autres minéraux argileux, appartiennent au groupe des phyllosilicates. Elles se présentent sous la forme de cristaux de très petite taille (quelques micromètres au maximum) qui apparaissent dans tous les domaines dits de la surface (altérites, sols, sédiments) ou de la subsurface (diagenèse, altérations hydrothermales). Les cristaux (ou cristallites) résultent de l'empilement des feuillets qui s'accrochent pour former des particules polycristallines. À l'échelle supérieure, les cristaux ou particules polycristallines, associés ou non à des minéraux secondaires, forment des agrégats. Les agrégats assemblés et les éventuels minéraux secondaires forment les argiles gonflantes.

Chaque feuillet est constitué de l'empilement de deux couches de base : a) la couche tétraédrique formée par des tétraèdres  $\text{SiO}_4^{4-}$  ou  $\text{AlO}_4^{5-}$  formant un réseau bidimensionnel, et b) la couche octaédrique, formée par des octaèdres suivant un réseau à symétrie hexagonale (cf. figure ci-dessous).



Représentation tridimensionnelle de la structure d'une argile 2:1 de type smectite (feuillet constitué de 2 couches tétraédriques encadrant 1 couche octaédrique) (Petit et al., 1999, d'après Grim, 1968)

#### La particularité des smectites : le déficit de charge et le gonflement interfoliaire

La structure cristalline des minéraux gonflants correspond à des feuillets 2:1 (TOT) (cf. figure ci-dessus). Des substitutions cationiques peuvent exister dans la couche tétraédrique ( $\text{Si}^{4+}$  par  $\text{Al}^{3+}$ ) et dans la couche octaédrique ( $\text{R}^{3+}$  par  $\text{R}^{2+}$ ), créant un déficit de charges positives dans le feuillet 2:1. Ce déficit est compensé par l'addition d'une couche interfoliaire cationique dans la structure cristalline. Le nombre des cations interfoliaires dépend de leur valence et de la valeur de la charge interfoliaire. Pour les smectites, cette charge peut varier entre 0,30 et 0,65 pour une composition de type  $\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ , ce qui modifie les propriétés chimiques et physiques des feuillets. Les cations sont faiblement fixés dans l'espace interfoliaire. Ils sont totalement échangeables et les molécules polaires telles que l'eau peuvent pénétrer dans cet espace, conférant une capacité d'expansion des feuillets (*i.e.* de gonflement) par adsorption de ces molécules polaires. Cette expansion est proportionnelle au nombre de couches d'eau (de 0 à 3). Ce nombre dépend surtout de la nature du cation interfoliaire et de la pression partielle ( $P/P_0$ ) d'eau. L'état d'hydratation maximum des smectites devient infini pour  $\text{Na}^+$  et  $\text{Li}^+$ ; il correspond à 3 couches d'eau pour  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ba}^{2+}$ . Le potassium autorise 2 couches d'eau dans les montmorillonites (charge octaédrique) et seulement 1 couche dans les autres smectites.

***La pression de gonflement et les faibles perméabilités à l'eau***

Lors de l'adsorption d'eau, il se forme une distribution diffuse des cations autour des feuillets, et notamment une concentration forcée d'ions créant ce que l'on appelle une « atmosphère ionique ». Puisque les charges positives des cations et les charges négatives des feuillets sont physiquement séparées, le système peut être considéré comme une double couche électrique assimilable à un osmomètre dont la membrane semi-perméable serait constituée d'un feuillet argileux. Il existe donc un gradient de pression osmotique dans l'espace inter feuillets, qui produit une force de répulsion. À l'échelle de l'argile gonflante, l'ensemble des forces de répulsion mises en jeu au niveau des feuillets se transmet au niveau des particules, puis des agrégats, et détermine la pression de gonflement. Si l'on interdit toute déformation, pour un cation interfoliaire donné, la pression de gonflement est d'autant plus forte que la densité de l'argile est élevée.

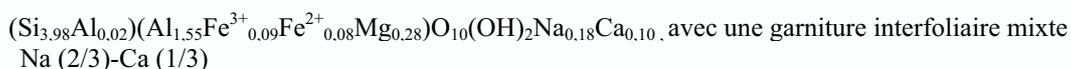
Ce lien intime entre l'eau et les feuillets, et de manière générale avec les agrégats est aussi à l'origine des faibles perméabilités des argiles gonflantes ( $\leq 10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$ ).

**Encadré 2.7 L'argile gonflante méthodologique MX80 retenue pour les études sur le stockage (Andra, 2005f, Tome 1)**

**Sa composition minéralogique**

La MX-80 est l'argile gonflante méthodologique retenue par l'Andra pour mener les études de faisabilité du stockage. Il s'agit d'une argile naturelle provenant du Wyoming (USA). Elle est constituée à environ 80 % de smectite et 20 % de minéraux accessoire (Quartz et cristobalite, Feldspaths sodi-calciques (plagioclases), Feldspaths potassiques (microcline ou sanidine), Biotite – phlogopite, Carbonates tels que calcite et ankérite, Phosphate sodi-calcique de type buchwaldite, Pyrite, Hématite) et de minéraux à l'état de trace (titane (0,1 %) et zirconium ; sulfates tels qu'anhydrite, barytine-célestine).

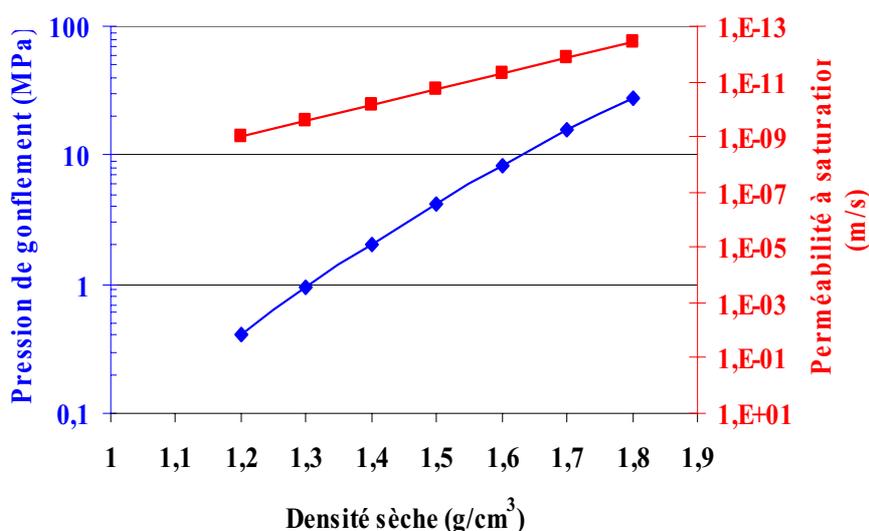
L'analyse par diffraction des rayons X montre que la smectite ne présente pas d'interstratifiés. Il s'agit d'une montmorillonite de basse charge, de formule structurale par demi-maille :



La fraction argileuse (< 2 µm) représente 84,6 % de la masse totale, ce qui est proche de la teneur en smectite. Cette fraction contient des traces de quartz et de biotite tandis que les fractions sable et limon sont enrichies en minéraux accessoires. La capacité d'échange cationique, déterminée sur une fraction purifiée, est de 87,5 meq/100g. La surface spécifique est estimée à environ 30 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>, ce qui est relativement élevé, surtout si l'on considère que la bentonite n'est constituée que d'environ 80 % de montmorillonite.

**Sa mise en forme pour l'utilisation dans le stockage**

Après extraction et traitement (broyage, concassage, séchage), la MX 80 se présente sous forme d'une poudre de couleur grise contenant des particules de plus grosse taille. Pour l'utilisation comme matériau, cette poudre est compactée suivant différentes techniques permettant d'obtenir des objets de dimensions et de forme variées : briques, tores, granulats (dits pellets). La compaction conduit à l'élimination de la macroporosité (diamètre supérieur à 50 nm) sans modification de la distribution des mésopores. À l'échelle millimétrique, le réseau poreux reste entièrement connecté. Les densités sèches obtenues sont ≥ 1,6 g.cm<sup>-3</sup> pour un degré de saturation en eau compris généralement entre 70 % et 90 %. Cette compaction confère alors à la MX80 ses propriétés de fort gonflement et de faible perméabilité (cf. figure ci-dessous) requises pour les ouvrages hydrauliques de fermeture du stockage (bouchons des alvéoles de stockage ; scelllements des galeries et des puits d'accès).



*Courbes de pression de gonflement et de perméabilité à l'eau de l'argile gonflante MX80*

*Encadré 2.8 Les matériaux cimentaires du stockage (Andra, 2005f, Tome 2)*

**Les formulations étudiées**

Les formulations de bétons étudiées par l'Andra sont composées de **granulats calcaires**, afin d'éviter les problèmes d'alcali-réaction et de ne pas relâcher de cations alcalins (Na, K), et de ciments de deux types :

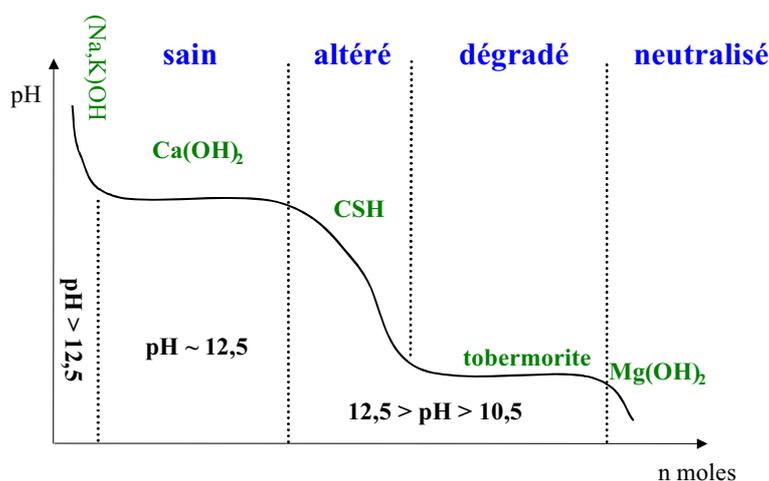
- **CEM I**, composé à plus de 95 % par un **clinker Portland**,
- **CEM V** (ciments au laitier et aux cendres), composé de 25 à 60 % de clinker Portland, de 20 à 45 % de **laitiers de hauts fourneaux** et de 20 à 45 % de **cendres volantes** issues des centrales thermiques à énergie fossile.

Les charges en ciment sont de l'ordre de  $400 \text{ kg.m}^{-3}$  et  $450 \text{ kg.m}^{-3}$  respectivement pour les CEM I et les CEM V. Sur le plan mécanique, des bétons étudiés appartiennent donc à la **classe des BHP** (« Béton Haute Performance ») dont la résistance à la compression simple est supérieure à 60 MPa.

**La chimie des eaux cimentaires et les états de dégradation chimique des bétons**

Lors de l'hydratation du ciment, la présence d'oxydes alcalins ( $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$ ) très solubles et d'oxydes alcalino-terreux ( $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ) dans le clinker conduit à la formation d'hydrates stables en milieu alcalin, qui confèrent aux eaux interstitielles des bétons un caractère basique avec un pH compris entre 10,4 et 12,5. Les principaux hydrates concernés sont la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  qui possède un pH d'équilibre voisin de 12,5 (lui conférant un rôle de tampon acido-basique) et les silicates de calcium hydratés (les CSH) dont le domaine de stabilité s'étend de 12,5 à 10,5 environ suivant le rapport calcium sur silice (C/S). À l'extrême, la brucite  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  possède un pH d'équilibre de 10,4. Le pH des eaux interstitielles des bétons peut être maîtrisé au travers de la formulation des bétons et ne pas dépasser la valeur de 12,5 visée.

Au contact d'une eau pure ou des eaux de la couche du Callovo-Oxfordien, l'évolution chimique d'un béton peut être décrite de manière simplifiée suivant différents états au fur et à mesure de la dissolution des pôles cimentaires réactifs indiqués ci dessus, comme schématisé sur la figure suivante.



*Schéma des états de dégradation chimique successifs des bétons en fonction du pH de leurs eaux interstitielles*

**Encadré 2.9 Les matériaux métalliques du stockage (Andra, 2005f, Tome 3)**

Deux types de matériaux métalliques sont rencontrés dans le stockage (hors gaines en zircaloy des crayons des assemblages de combustibles usés) :

- **Les aciers inoxydables** ou les alliages passivables (Fe-Cr-Ni- Mo) au sens large.

Ils constituent principalement a) les *enveloppes primaires de nombreux colis primaires de déchets B*, comme les colis de boues bitumées (B2) et les colis de coques et embouts et déchets technologiques compactés (B5), et b) l'*enveloppe primaire des colis de déchets vitrifiés*. Pour cette dernière, il s'agit d'un acier inoxydable réfractaire Z15CN2313 avec un taux de carbone abaissé à 0,08 % de manière à éviter la corrosion inter granulaire, tandis que la nuance AISI 309S plus standard est celle des enveloppes primaires des colis primaires de déchets B.

Le mécanisme dominant de la **corrosion des aciers inoxydables** est la **propagation de piqûres ou de crevasses**, mais les vitesses de corrosion peuvent être très faibles, inférieures à quelques dixièmes de  $\mu\text{m}/\text{an}$ , notamment en conditions réductrices (attendues après la fermeture du stockage) et même en présence de chlorures. La réalisation des soudures est délicate et ces dernières constituent potentiellement des zones de corrosion privilégiées.

- **Les aciers non ou faiblement alliés**

Ils constituent principalement a) les *conteneurages des colis de stockage de déchets C et des combustibles usés* et b) les *composants d'infrastructure des alvéoles de stockage de ces colis (chemisage, soutènement)*.

Le choix d'aciers non ou faiblement alliés pour les conteneurages résulte des capacités technologiques démontrées (métallurgie, soudabilité,...), de bonnes propriétés mécaniques et chimiques (prédictibilité de la corrosion), et un coût limité (matériau de base et réalisation de l'objet). Parmi les aciers non alliés, la nuance P235 a été choisie pour mener les études de réalisation de ces conteneurages, pour les raisons suivantes :

- une bonne soudabilité (faible teneur en carbone) ;
- une structure moins sensible à la fissuration à froid dans la zone de soudage (faible limite élastique) ;
- une limite élastique suffisante pour résister à une contrainte extérieure isotrope minimale d'au moins 12 MPa ;
- l'absence de la nécessité d'un traitement thermique post soudage.

La **corrosion généralisée** est le mécanisme dominant de la corrosion des aciers non ou faiblement alliés. Les cinétiques de corrosion en milieu argileux sont bien connues grâce à un retour d'expérience important : essais d'exposition de longues durées et travaux de laboratoires permettant d'identifier les mécanismes de corrosion. En conditions réductrices, ces vitesses sont de l'ordre de *quelques  $\mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$  au maximum* ; elles permettent d'envisager des tenues à la corrosion de plusieurs milliers à dizaines de milliers d'années, pour des épaisseurs pluridécimétriques, d'autant que des valeurs très faibles, inférieures à quelques dixièmes de  $\mu\text{m}/\text{an}$ , sont observées expérimentalement. En conditions anoxiques ou réductrices, les vitesses de corrosion de ces aciers varient peu avec les variations de composition chimique des eaux de l'environnement. La composition chimique et la structure métallurgique (éventuellement modifiées localement par le soudage) ne sont pas des facteurs significativement influents sur la corrosion. Enfin, une corrosion localisée peut être observée, notamment lors des premières phases de corrosion (en milieu oxydant), mais son importance relative, vis-à-vis de la corrosion généralisée, décroît dans le temps.

Pour les composants d'infrastructure des alvéoles de colis de déchets vitrifiés et de colis de combustibles usés, d'autres nuances d'acier sont envisagées, par exemple des aciers P355 ou (S355) qui ont une résistance mécanique plus élevée que les aciers P235, mais présentent des risques de corrosion sous contrainte et de fragilisation par l'hydrogène plus importants.



# 3

## L'état initial du milieu géologique avant la réalisation du stockage

---

3.1	Introduction.....	95
3.2	Le cadre général.....	95
3.3	Les différentes formations géologiques.....	108
3.4	La tectonique et la fracturation.....	152
3.5	L'environnement de surface.....	161
3.6	Synthèse sur l'état initial du milieu géologique.....	167



### 3.1 Introduction

L'état actuel des formations géologiques sédimentaires et des ensembles qu'elles constituent (bassin par exemple) résulte de l'accumulation et de la superposition d'un ensemble de phénomènes géologiques ayant marqué leur histoire depuis le dépôt des sédiments jusqu'à l'actuel. La reconstitution de cette histoire nécessite une approche multiéchelle de la plaque au bassin, puis à la région et enfin au site d'intérêt.

C'est pourquoi ce chapitre aborde le cadre géologique d'abord à l'échelle du bassin de Paris puis, à l'échelle du secteur de Meuse / Haute-Marne, ce dernier correspondant à une zone de 40 km d'Est en Ouest et 60 km du Nord au Sud centrée sur la position du laboratoire (Figure 2.2.1). Il décrit les états phénoménologiques (hydrogéologique, chimique, thermique et mécanique) de l'ensemble de la série à l'aplomb du site à l'actuel (cf. § 3.2). Les paragraphes 3.3.1 et 3.3.2 décrivent plus précisément les caractéristiques du Callovo-Oxfordien et des encaissants. Les différentes échelles de fracturation et leur influence sur les caractéristiques des formations sont abordées dans le paragraphe 3.4. Enfin, le paragraphe 3.5 présente l'environnement de surface.

### 3.2 Le cadre général

Le bassin de Paris, avec ses séries sédimentaires montrant des faciès variés et sa disposition en auréoles, a fait l'objet de nombreuses études géologiques notamment dans le cadre de campagnes de recherches de ressources (eau, pétrole, gaz, charbon, ...), en surface et en profondeur. Ces dernières ont permis d'accumuler une base de connaissance importante. À ce titre, le cadre géologique général du bassin de Paris est très bien documenté.

Dans ce cadre général, le site de Meuse / Haute-Marne, situé sur la bordure Est du bassin de Paris, appartient à une zone ne présentant pas de potentialités pour ces ressources, notamment le charbon et le pétrole. Les zones d'intérêt pour les ressources en charbon, dans le prolongement du Bassin Sarro-Lorrain, se développent plus au Nord du secteur, le potentiel au niveau du site étant limité par la nature même du remplissage permo-carbonifère (absence probable de veines de houille importantes) et par sa profondeur (supérieure à 3 500 m) (Donsimoni, 1981) et (Andra, 2005h, chapitre 8). Concernant le pétrole, les approches menées à l'échelle du bassin, notamment par l'IFP (Espitalié *et al.*, 1987), dans les années 70 et 80, ont montré que les zones d'intérêt se situaient plus à l'Ouest, vers le centre du bassin. Aux alentours du site, comme dans toute l'auréole orientale du bassin, les principales roches-mères potentielles (argiles du Lias) sont immatures et n'ont donc pu exprimer sous forme d'hydrocarbures le kérogène qu'elles contiennent (Hanzo & Espitalié, 1994 ; Kruge *et al.*, 1997 ; Landais *et al.*, 1989). Ainsi, à partir du milieu des années 1980, la région est restée à l'écart des campagnes intensives de recherches d'hydrocarbures, contrairement à la zone centrale du bassin, ce qui explique la densité de forages plus faible et une couverture sismique moindre aux alentours du site.

À partir du milieu des années 90, les travaux menés par l'Andra pour la caractérisation du site et l'implantation du laboratoire souterrain de recherche ont complété les données anciennes de forages et de géophysique existantes ainsi que les connaissances de géologie de surface. Ces travaux se sont organisés en plusieurs phases (Figure 3.2.1) (Andra, 2005h, chapitre 6) :

- de 1991 à 1998, des travaux préalables ont été menés à l'échelle du secteur, avec le retraitement de la géophysique existante et la réinterprétation des anciennes données de forages, la réalisation de levés de terrain détaillés, de cinq forages profonds et d'une campagne de sismique réflexion 2D ;
- en 1999 et 2000, avant la construction du laboratoire souterrain, les travaux réalisés ont consisté en une campagne de sismique réflexion 3D de 4 km<sup>2</sup>, quatre forages à but hydrogéologique et géochimique sur la plateforme du laboratoire, complétés par les deux forages à but géologique forés dans l'axe des puits ;

- en 2003, huit forages répartis sur cinq plateformes (campagne FSP) ont été implantés à l'échelle du secteur, dans l'objectif de mieux contraindre les connaissances hydrogéologiques à cette échelle ;
- en 2004, huit forages, dont quatre déviés (campagne FRF) ont exploré le milieu géologique avec pour objectif de reconnaître la couche et ses encaissants dans l'environnement immédiat du site ;
- enfin, depuis août 2000, le creusement des puits du laboratoire permet la collecte d'informations in situ par l'intermédiaire du suivi scientifique de ce creusement (suivi géologique, prise d'échantillons, caractérisation géomécanique,...). Ce suivi est complété depuis 2004, par les données issues du suivi du creusement de la galerie expérimentale à -445 m, ainsi que des premiers résultats des expérimentations qui y sont menées.

Ces investigations ont autorisé la collecte d'informations et d'échantillons qui ont contribué à construire, à l'échelle du site et du secteur, un modèle s'inscrivant dans le cadre des connaissances acquises plus globalement sur le bassin et permettant de rendre compte de l'état initial du site.

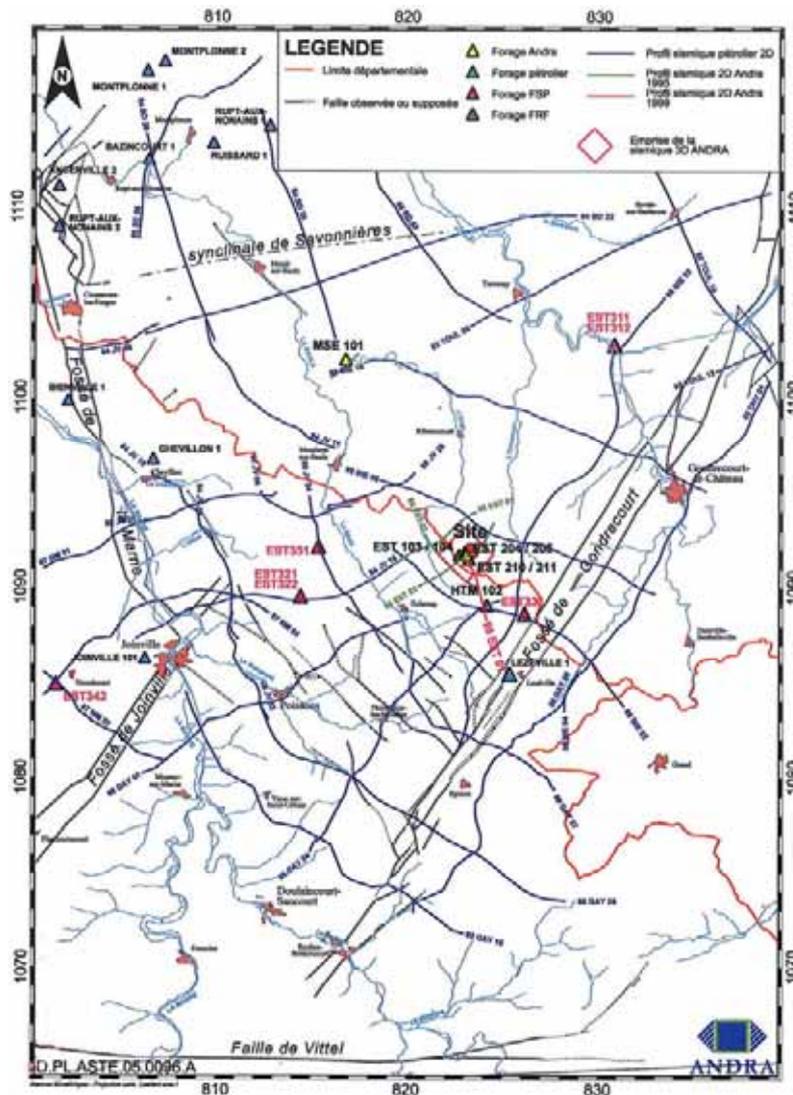


Figure 3.2.1 Données disponibles et localisation des travaux menés par l'Andra sur le secteur de Meuse / Haute-Marne

### 3.2.1 La géologie

#### 3.2.1.1 A l'échelle du bassin de Paris

L'histoire du bassin de Paris débute sur un substratum hérité de l'histoire paléozoïque et aplani. Durant l'ère secondaire, de -250 à -135 Ma (millions d'années), et sur une superficie dépassant largement le cadre géographique actuel du bassin de Paris, des séries sédimentaires, d'abord à dominante continentale (Trias inférieur), puis marine (Trias supérieur, Jurassique), se déposent en couches épaisses, dans un contexte tectonique relativement stable. Durant cette époque, le bassin est largement ouvert vers l'Est (Figure 3.2.2, a et b) (Dercourt *et al.*, 1993 ; Mégnien, 1980). Les couches à l'affleurement sur le secteur de Meuse / Haute-Marne sont datées de la fin de l'ère secondaire. Après un retrait de la mer, il y a 120 Ma, dû à l'ouverture de l'Atlantique, la sédimentation reprend au Crétacé, avec notamment le dépôt de la craie (Figure 3.2.2, c) (Cavelier *et al.*, 1980a). C'est durant l'ère tertiaire (-65 Ma) que le bassin prend petit à petit sa structure actuelle à la suite de différentes phases tectoniques, (Bergerat, 1985 ; Villemin, 1986) : la phase pyrénéenne (qui correspond à la collision entre la plaque africaine et la plaque ouest européenne), la phase d'extension de l'Oligocène (-34 Ma environ, responsable de la formation du fossé rhénan) et enfin la phase compressive correspondant à la poussée alpine (depuis -23 Ma jusqu'à l'actuel). Sous l'action de ces phases successives, les bordures du bassin de Paris se relèvent, s'exondent et sont soumises à l'érosion. Les dépôts marins, puis lagunaires, sont alors restreints au centre du bassin (Figure 3.2.2, d) (Mégnien, 1980). À partir du Néogène (-23 Ma), la mer se retire complètement et les modelés topographiques évoluent alors vers ce qui est observé aujourd'hui : l'érosion laisse en relief les formations résistantes, calcaires notamment, tout en déblayant plus rapidement les formations argileuses plus tendres (Figure 3.2.2, e). Lors des 3 derniers millions d'années, des cycles climatiques de forte amplitude font alterner des périodes de grands froids et des périodes tempérées à intervalle de l'ordre de 100 000 ans. Durant les périodes froides, le gel du sous-sol en profondeur (jusqu'à plus de 100 mètres) peut rester permanent toute l'année (on parle alors de pergélisol) (Berger, 1992). Ces cycles climatiques contribuent également à influencer les modelés topographiques et le rythme de creusement des lits des rivières (Mégnien, 1980).

La structure générale du bassin se présente donc actuellement comme une cuvette, remplie d'une succession de couches sédimentaires dont les plus anciennes affleurent sur les bordures et les plus récentes au centre du bassin, au niveau de l'Ile de France (Figure 3.2.3). À l'aplomb de la Brie, le remplissage secondaire et tertiaire est de plus de 3 000 m d'épaisseur. Il n'est que de l'ordre de 1 800 m à l'aplomb du site, du fait de la disparition, par érosion, des terrains les plus récents. Cette structure est affectée localement par des failles dont les plus importantes sont un héritage de l'histoire primaire du socle du bassin (faille de Bray, de Vittel, ...). Ces failles ont pu jouer durant toute l'histoire du bassin (Bergerat, 1985 ; Coulon, 1992). D'une manière générale, le rapport entre le remplissage du bassin (subsidence) et son diamètre montre une valeur de 5/1 000, valeur qui caractérise les bassins de plate-forme stable (Cavelier *et al.*, 1980b).

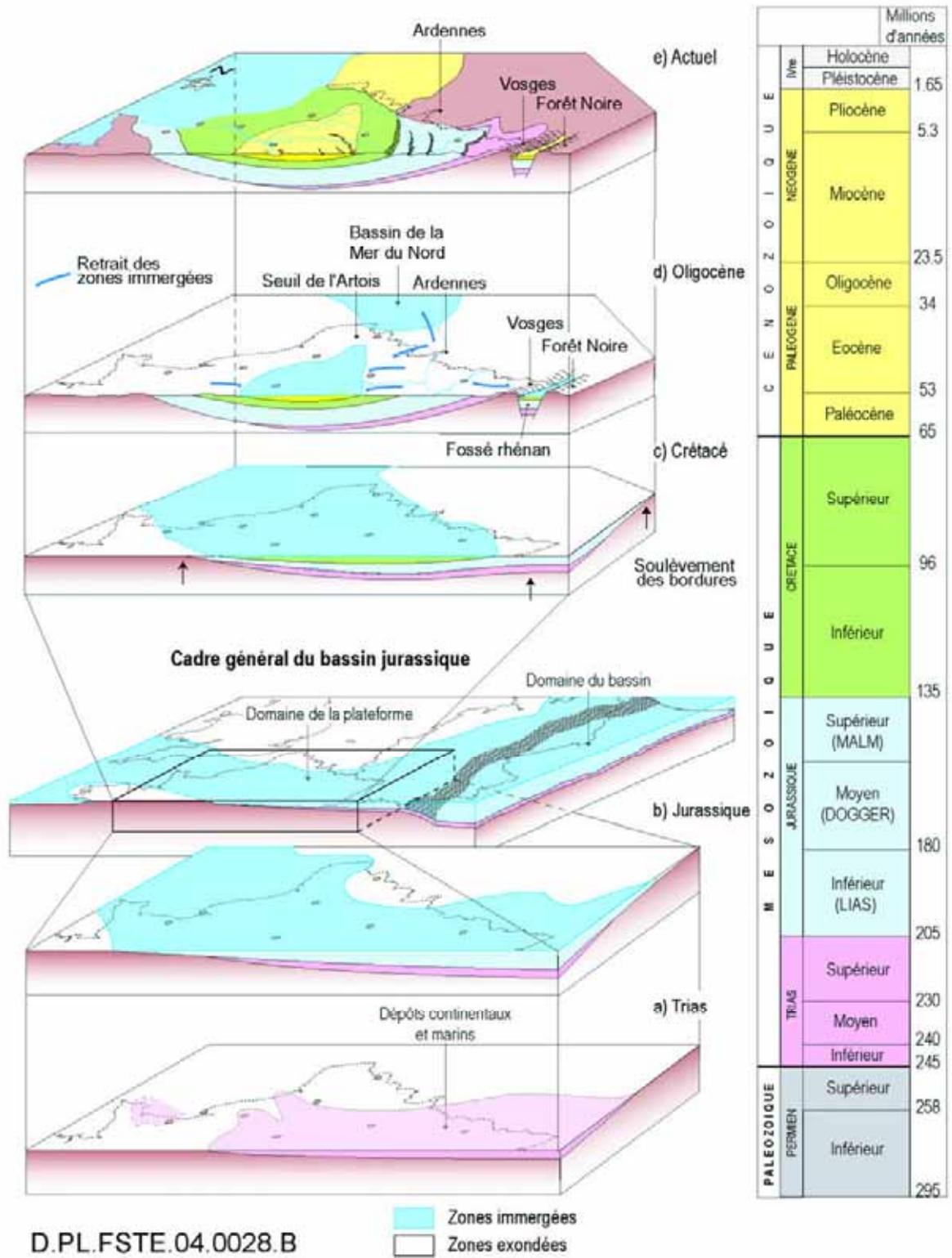


Figure 3.2.2 Schématisation de la formation du bassin de Paris depuis le Paléozoïque jusqu'à l'Actuel

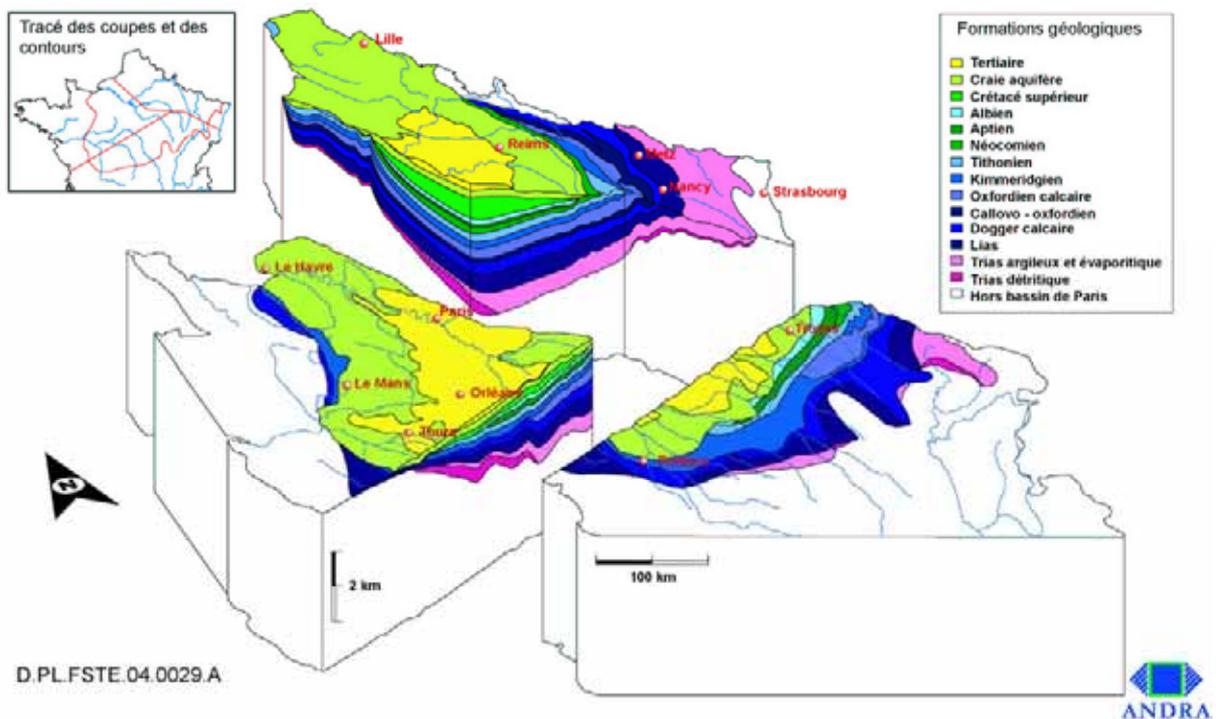


Figure 3.2.3 Bloc diagramme 3D de la structure géologique du bassin de Paris

### 3.2.1.2 A l'échelle du secteur

Sur le secteur, les 1 000 premiers mètres de formations, comprenant le Callovo-Oxfordien et ses encaissants, sont constitués par l'ensemble des couches déposées dans un environnement marin durant le Dogger et le Malm (de -180 à -135 Ma). Cette série sédimentaire est constituée d'alternances de formations calcaires et de formations à dominante argileuse, correspondant aux variations des conditions de dépôts à chacune des époques. Ces variations sont le résultat de la combinaison de la subsidence du bassin et des variations du niveau de la mer (Guillocheau *et al.*, 2002) : les formations calcaires se déposent dans des environnements peu profonds alors que les formations plus argileuses correspondent à des milieux de plus grande profondeur d'eau (de l'ordre de la centaine de mètres) et donc plus éloignés des côtes. Étant donné le contexte tectonique stable du bassin durant le Jurassique, ces formations montrent de grandes continuités latérales. La série sédimentaire est constituée, de bas en haut (et d'Est en Ouest aux affleurements) par (Figure 3.2.4) :

- la formation calcaire du Dogger reposant sur les marnes et argiles liasiques,
- la formation argileuse du Callovo-Oxfordien,
- la formation calcaire de l'Oxfordien moyen à supérieur,
- le Kimméridgien marneux, marquant un nouvel approfondissement,
- à l'affleurement au niveau du site, les calcaires du Tithonien (Calcaires du Barrois),
- quelques minces recouvrements de Crétacé argilo-sableux (placages) couvrant les points hauts topographiques.

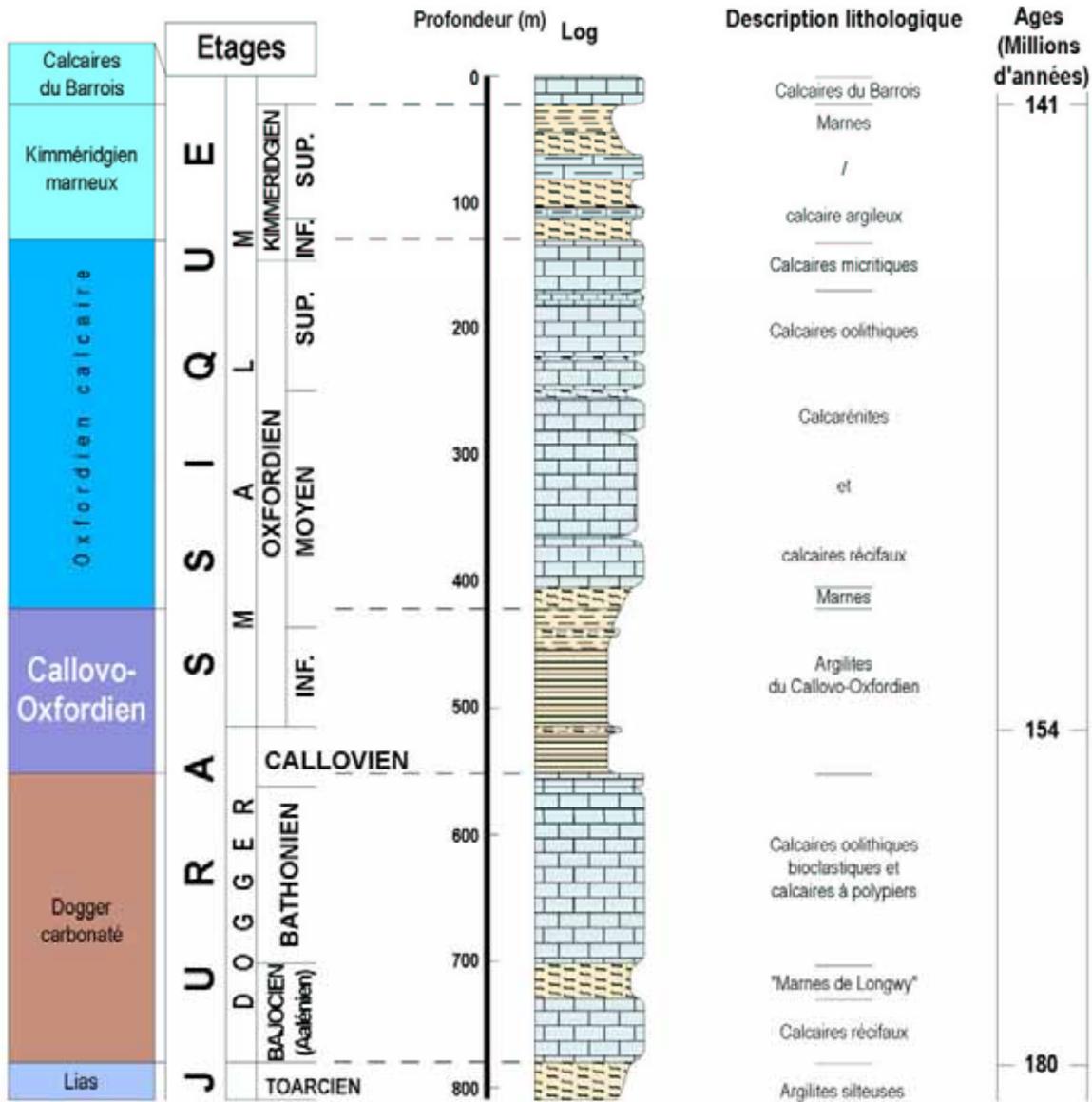


Figure 3.2.4 Succession lithologique à l'aplomb du site de Meuse / Haute-Marne

En accord avec la structure générale du bassin de Paris, ces couches sédimentaires montrent, sur le secteur de Meuse / Haute-Marne, une structure simple, monoclinale, sur plusieurs centaines de km<sup>2</sup>, avec un faible pendage régulier de 1° à 1,5° vers le Nord-Ouest (Figure 3.2.5) (Elion, 2005 ; Trouiller & Benabderrahmane, 2005). Cette structure est localement affectée par de légères déformations de grande longueur d'onde (décakilométrique) dont le synclinal de Savonnières, au nord du secteur. Les failles régionales encadrant le secteur (failles de la Marne et faille de Poissons de direction Nord-Nord-Ouest/Sud-Sud-Est, fossé de Gondrecourt de direction Nord-Nord-Est/Sud-Sud-Ouest, faille de Vittel, Est / Ouest), qui affectent toute la série secondaire, n'ont eu que des jeux mineurs durant la période du dépôt de ces formations et ont surtout été actives postérieurement, durant le Tertiaire (Trouiller & Benabderrahmane, 2005) (cf.§ 3.4).

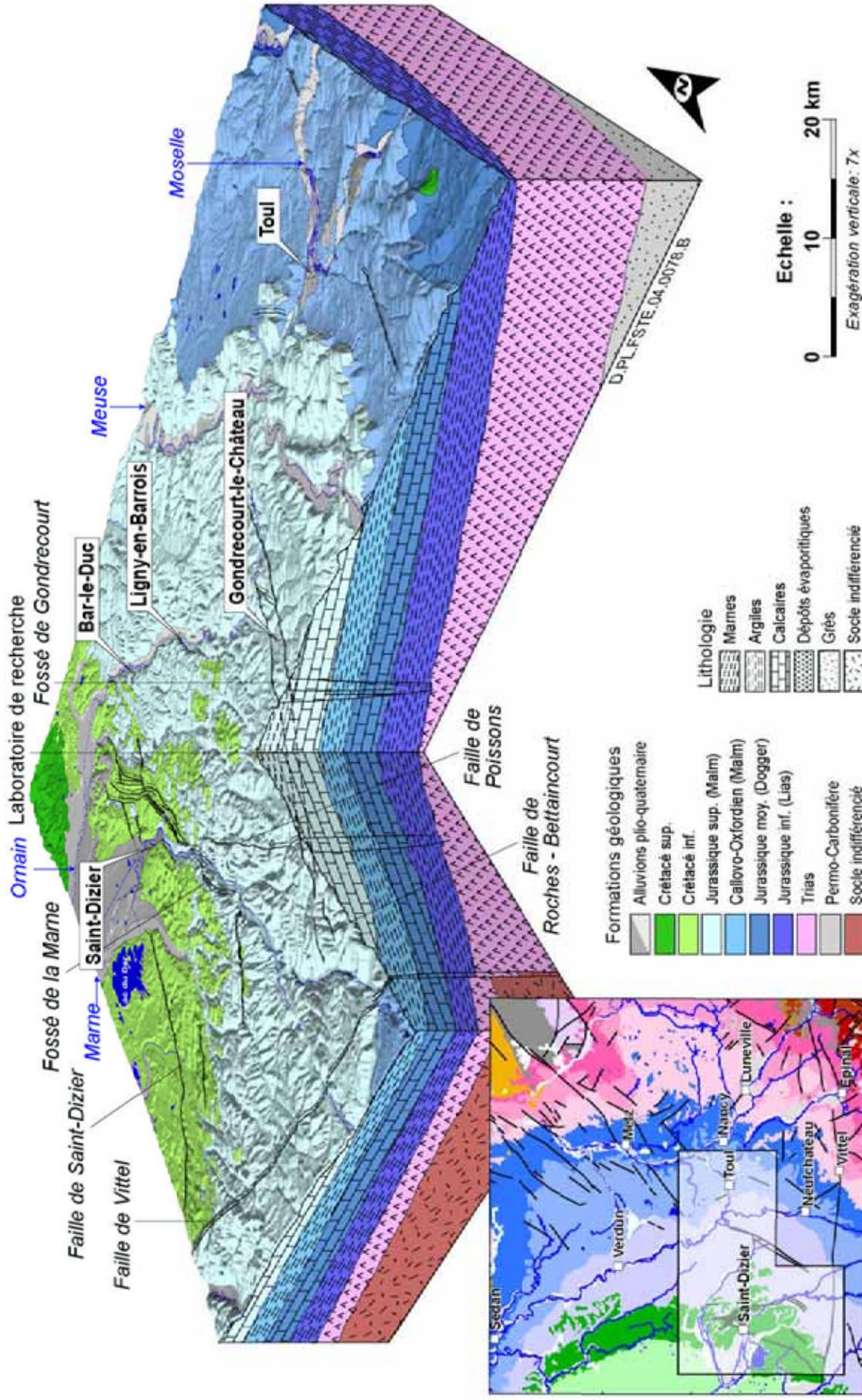


Figure 3.2.5 Bloc diagramme 3D de la structure géologique du secteur de Meuse / Haute-Marne

L'alternance calcaires-argiles et le pendage régional de 1° à 1,5° engendrent aux affleurements un relief de côtes typique. Ainsi, en surplomb de zones argileuses formant des dépressions, les formations calcaires plus résistantes apparaissent sous forme de côtes d'une hauteur de l'ordre de la centaine de mètres et dont les fronts sont prolongés vers l'Ouest par de vastes zones de plateaux (Figure 3.2.6). Les sols, correspondant à l'altération des sédiments, sont peu épais et caillouteux sur les côtes, plus profonds et limoneux dans les dépressions argileuses. Les reliefs contrôlent également les écoulements de surface, les eaux superficielles ayant tendance à rejoindre le pied des côtes, déterminant ainsi des chevelus hydrographiques dissymétriques. Ainsi, à l'Est du secteur, la Moselle et la Meuse s'écoulent vers le Nord, guidées par les côtes du Dogger et de l'Oxfordien. À l'Ouest du secteur, la région est drainée vers le Nord et le Nord-Ouest par la Marne et ses affluents (Ornain, Saulx, Rongean). Ces derniers, s'écoulant dans le sens du pendage des couches, entaillent profondément les Calcaires du Barrois. Les bassins versants ainsi déterminés sont le résultat d'une évolution complexe des cours amont de ces rivières liée à l'érosion et à des phénomènes de capture (cf. § 9.5 et (Brulhet, 2005b)).

La morphologie actuelle, liée à la lithologie des couches à l'affleurement, est ainsi le résultat d'évolutions successives de la topographie initiées depuis le retrait définitif de la mer de cette partie du bassin (à la fin du Crétacé, vers -65 Ma). Ces processus superficiels ont eu peu d'effets en profondeur (Brulhet, 2005b).

La série sédimentaire peut être considérée comme étant à l'équilibre général, hydrauliquement, chimiquement, thermiquement et mécaniquement. Cet état d'équilibre vis-à-vis des principaux phénomènes est acquis depuis plusieurs Ma et n'a évolué que lentement. Seules, les modifications apportées par les variations climatiques à 100 000 ans créent des perturbations transitoires (essentiellement hydrauliques dans les encaissants) qui ne remettent pas en cause cet équilibre général.

### 3.2.2 Le cadre sismo-tectonique

La convergence actuelle entre la plaque africaine et la plaque européenne est faible, de l'ordre de quelques millimètres au centimètre par an (Le Pichon, 2004). L'essentiel de ce mouvement est absorbé par la déformation se produisant dans les zones montagneuses (Mahgreb et Alpes à la latitude de la France). Le reste des mouvements est absorbé par les glissements le long des grandes failles de la plaque : c'est le cas notamment du rift ouest-européen. Là existe une sismicité notable ainsi que des déformations reconnues comme d'origine tectonique. Les glissements sur les failles les plus actives sont de l'ordre de 0,01 à 0,1 mm.an<sup>-1</sup> dans le fossé du Rhin inférieur et de 0,01 à 0,001 mm.an<sup>-1</sup> en Alsace (Brulhet, 2005a). Avec de telles vitesses, et compte tenu de la grande dimension des failles, il est possible d'engendrer, dans la zone du fossé du Rhin, des séismes de magnitude pouvant atteindre 7,0 ± 0,4 avec une période de retour comprise entre 10 000 ans et 250 000 ans. Hors de ces zones, les mouvements possibles sont encore plus faibles et ne concernent que les failles régionales qui affectent le socle (Brulhet, 2005a) (failles de la Marne et de Vittel par exemple – cf. § 3.4). Sur ces failles, le glissement possible est extrêmement lent, estimé entre 0,001 et 0,0001 mm.an<sup>-1</sup>, selon l'importance de la faille.

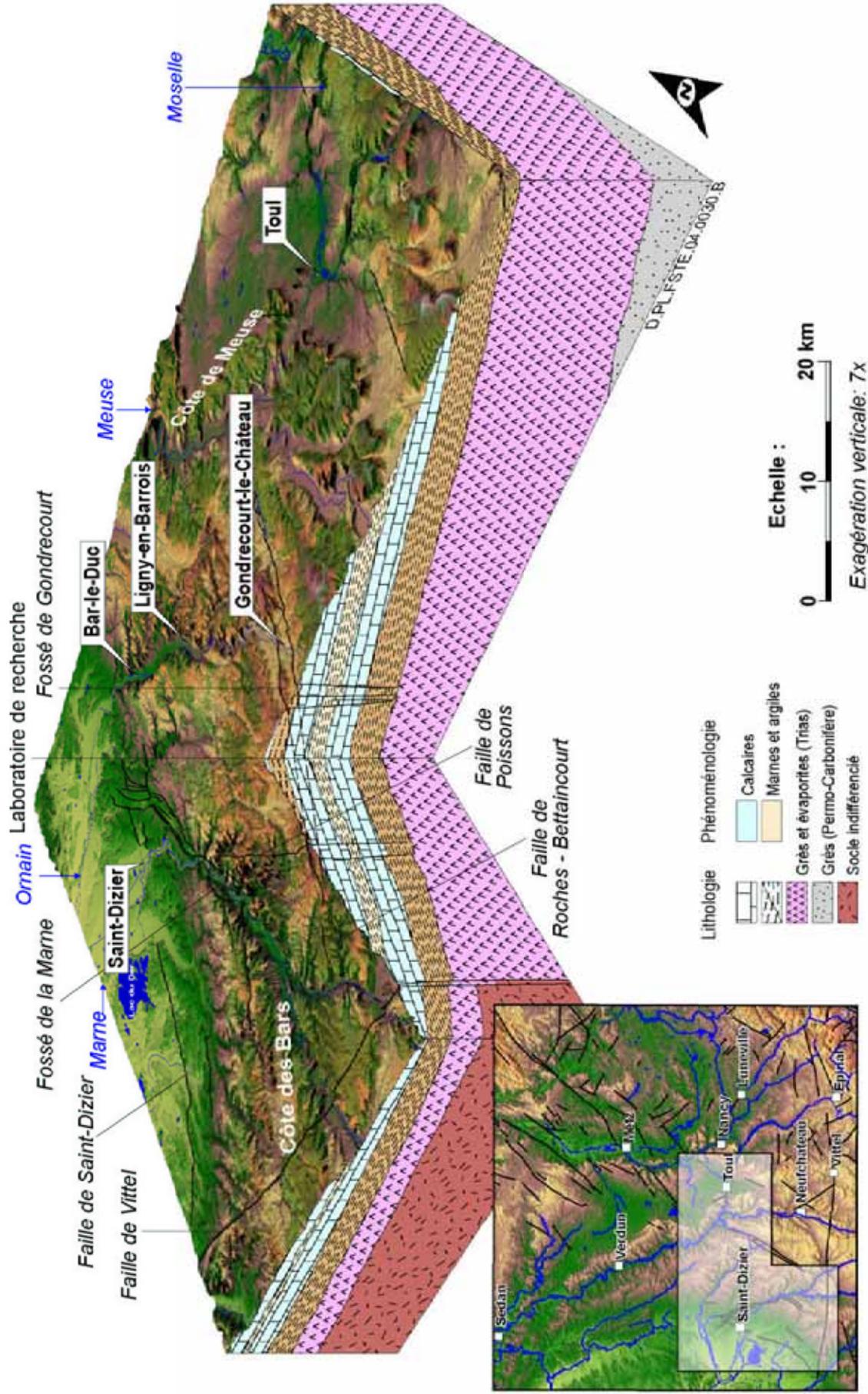


Figure 3.2.6 Bloc diagramme 3D de la lithologie et du relief du secteur de Meuse / Haute-Marne

Ces considérations expliquent pourquoi le bassin de Paris est une région à très faible sismicité, à l'écart des zones actives situées sur ses bordures (fossé rhénan notamment).

Dans ce domaine intra-plaque, le secteur de Meuse / Haute-Marne apparaît de plus comme une zone remarquable de la plaque ouest européenne. La lithosphère y présente une épaisseur uniforme, contrastant avec les régions plus orientales, notamment le fossé rhénan (Figure 3.2.7). Cette uniformité est caractéristique des zones stables et peu déformées. La zone apparaît asismique, tant vis-à-vis de la sismicité historique que pour les périodes géologiques récentes : il n'a pas en effet été retrouvé d'indices quaternaires d'activité tectonique sur les failles majeures encadrant le secteur. Le secteur correspond ainsi à une zone très stable d'un point de vue sismo-tectonique. Les séismes maximums possibles dans ce contexte sont estimés de l'ordre de  $6,1 \pm 0,4$  sur les failles régionales encadrant le secteur (fossé de Gondrecourt, failles de la Marne), avec des périodes de retour comprises entre 100 000 et 1 000 000 ans (cf. § 9.2).

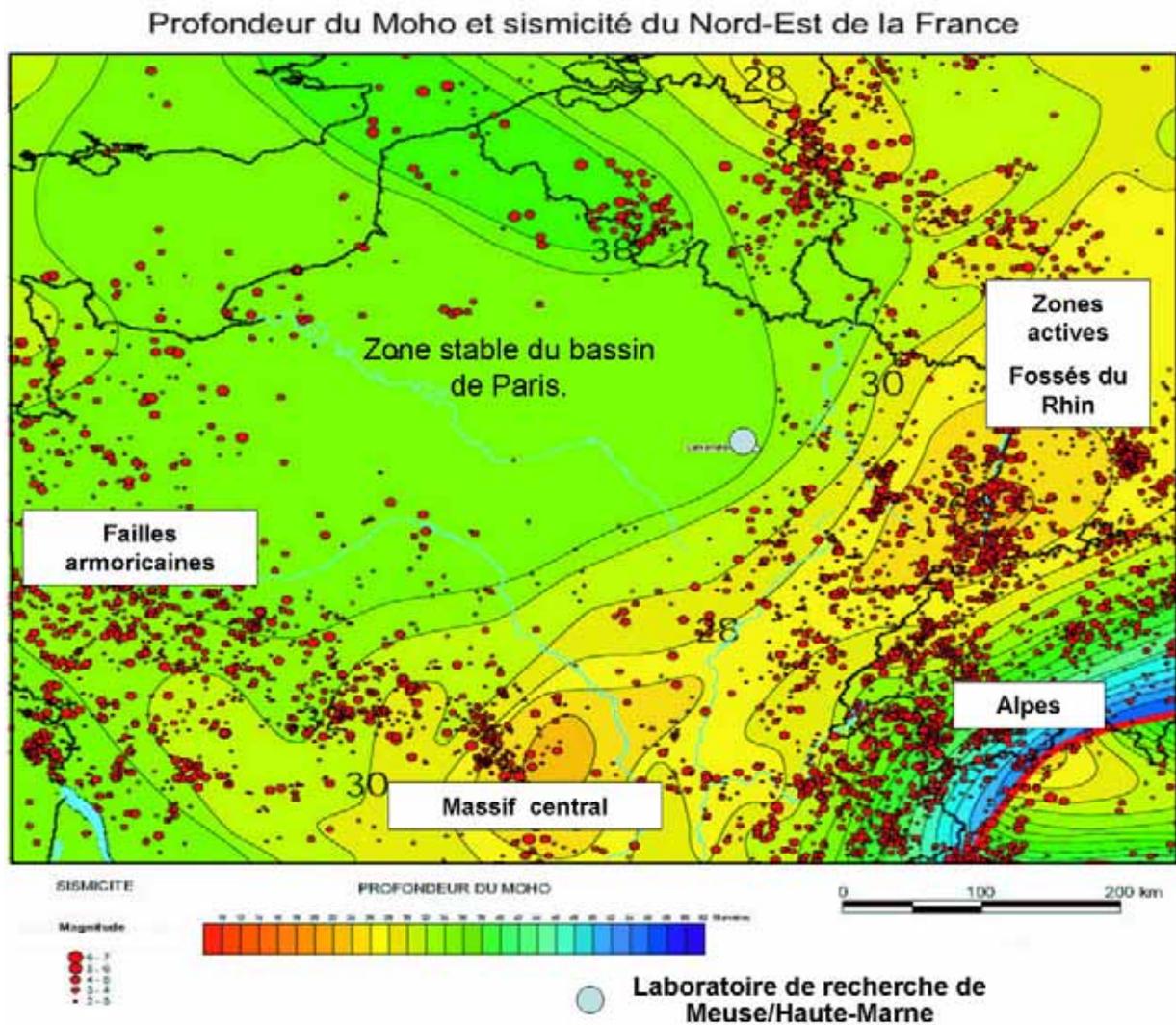


Figure 3.2.7 Cadre géodynamique de l'Est de la France : relation entre la sismicité et l'épaisseur de la croûte terrestre (Andra, 2005h, chapitre 35)

### 3.2.3 L'hydrogéologie et la chimie des eaux

#### 3.2.3.1 Les écoulements d'eau au sein des formations et entre les formations

La succession lithologique des différentes couches conditionne le cadre hydrogéologique à l'échelle du secteur : les couches calcaires ont un comportement d'aquifère alors que les formations argileuses se comportent comme des horizons imperméables. Dans les aquifères, les circulations s'organisent à partir des affleurements, situés sur des zones de plateaux, où les altérations de surface (action des eaux de pluie) augmentent fortement les perméabilités, avec fréquemment des phénomènes de karstification. En surface, ces aquifères montrent des écoulements vers les rivières. En profondeur, du fait du pendage, de la continuité lithologique des couches et de la présence des formations imperméables de part et d'autre des aquifères, les écoulements à l'échelle du secteur se font globalement à l'intérieur de chacun des aquifères en direction de l'Ouest et du Nord-Ouest, vers le centre du bassin, puis vers la Manche (Figure 3.2.8) (Gonçalvès, 2002 ; IFP, 2004 ; Trouiller & Benabderrahmane, 2005 ; Wei *et al.*, 1990). La présence d'horizons imperméables empêche tout écoulement vertical, d'un aquifère à l'autre. Seuls les accidents régionaux tels que les failles de la Marne ou le fossé de Gondrecourt ont pu permettre une communication entre aquifères à certaines périodes comme l'Oligocène (phase extensive). Ce rôle de drain vertical est également possible à l'actuel pour les failles, et notamment les failles de la Marne, dont la direction est parallèle à la contrainte horizontale majeure orientée Nord-Nord-Ouest/Sud-Sud-Est (Trouiller & Benabderrahmane, 2005) (cf. § 3.2.4).

Cette indépendance hydraulique des formations aquifères conduit à des champs de charge différents d'un aquifère à l'autre. Ainsi, le champ de charge du Dogger montre des gradients faibles de l'ordre de  $10^{-3} \text{ m.m}^{-1}$  à l'échelle du secteur avec des écoulements orientés vers le Sud-Ouest (cf. § 3.3.2.1). Le champ de charge de l'Oxfordien carbonaté présente des gradients un peu plus forts (de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-3} \text{ m.m}^{-1}$ ) et des directions légèrement différentes (Nord-Ouest à Ouest – cf. § 3.3.2.2). Les faibles perméabilités rencontrées dans ces formations carbonatées (de  $10^{-8}$  à  $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$  selon les intervalles (Trouiller & Benabderrahmane, 2005) et les faibles porosités cinématiques (inférieures à 10 %) imposent, à l'échelle du secteur, des vitesses de transfert convectif lentes, de l'ordre de quelques à la dizaine de kilomètres par million d'années, ainsi que le confirment les résultats d'analyses isotopiques ( $^{36}\text{Cl}$  notamment pour l'Oxfordien carbonaté) (Buschaert & Giffaut, 2005).

Cette organisation des circulations à l'échelle régionale se traduit également par des caractéristiques chimiques et isotopiques contrastées des eaux des formations. Ces eaux passent d'un caractère oxydant, en surface, à un caractère réducteur en profondeur. Sous le Kimméridgien marneux à l'aplomb du site, du fait des faibles vitesses de circulation, les eaux de l'Oxfordien et du Dogger sont à l'équilibre avec les phases solides des minéraux carbonatés constituant les horizons poreux. Elles montrent toutes des pH neutres proches de 7-7,5. Ces eaux sont donc peu réactives vis-à-vis des phases solides. Les eaux du Dogger sont plus salées (de l'ordre de quelques  $\text{g.L}^{-1}$ ) que celles de l'Oxfordien (moins de  $1 \text{ g.L}^{-1}$ ). Cette salinité des eaux du Dogger semble s'expliquer, à l'échelle du bassin, par des transferts verticaux des eaux triasiques salées vers le Dogger, à la faveur des accidents régionaux lors de leurs rejeux successifs au cours de l'histoire du bassin, mais également, étant donné les échelles de temps concernées, par diffusion des chlorures du Trias au travers les argiles du Lias (cf. § 3.3.2.1).

Cette différence de salinité entre les encaissants sous- et sus-jacents au Callovo-Oxfordien montre le rôle de barrière joué par ce dernier vis-à-vis des écoulements et du transport des solutés. Ce rôle est également illustré par le profil de concentration en chlore, compatible avec celui d'un milieu à faible perméabilité, dans lequel la diffusion est dominante et ayant atteint un état d'équilibre (régime stationnaire) (Altmann & Coelho, 2005). Ces observations sont cohérentes avec l'ensemble des mesures des perméabilités du Callovo-Oxfordien faites en forages ou sur échantillons. Ces dernières

sont généralement faibles, comprises entre quelques  $10^{-13}$  et quelques  $10^{-14}$  m.s<sup>-1</sup> (cf. § 3.3.1.6), limitant les écoulements, et permettant ainsi aux phases solides de contrôler la chimie des eaux (cf. § 3.3.1.8). Dans cette formation, les champs de charge sont déterminés par les conditions aux limites qu'imposent les aquifères sus- et sous-jacents (cf. § 3.3.1.6).

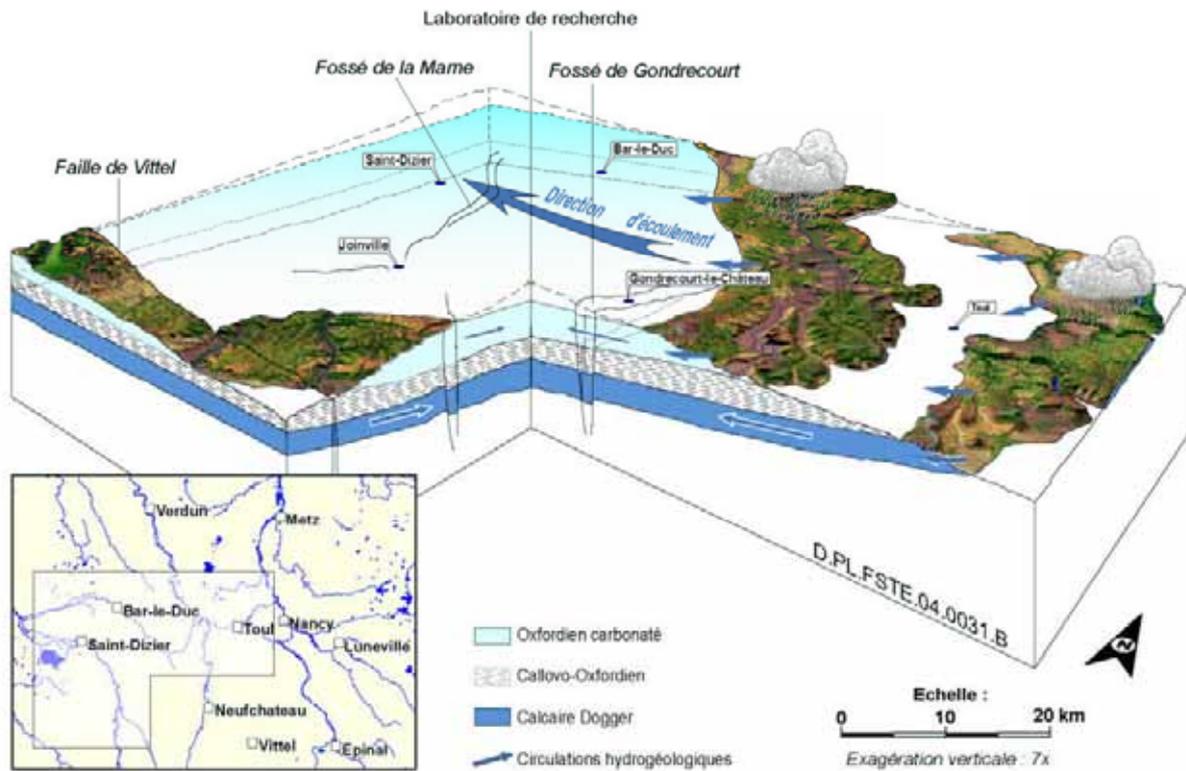


Figure 3.2.8 Bloc diagramme 3D des systèmes hydrogéologiques du secteur de Meuse / Haute-Marne

### 3.2.3.2 Les effets des cycles climatiques passés

Depuis les 3 derniers Ma, des cycles climatiques glaciaire-interglaciaire ont provoqué, à des intervalles d'environ 100 000 ans, le blocage des infiltrations aux affleurements et des sorties aux exutoires en période de gel, voire le blocage des circulations au sein même des formations selon la profondeur du pergélisol (cf. § 9.4.1 et (Brulhet, 2005b)). Ces perturbations transitoires et réversibles n'ont eu que peu d'impact en profondeur. Elles ralentissent les vitesses d'écoulement déjà faibles et perturbent peu les équilibres chimiques des formations en profondeur, ces derniers étant contrôlés par les phases minérales.

En revanche, les cycles climatiques passés ont modifié la morphologie de la surface, par le biais de l'érosion, affectant plus profondément et de manière irréversible les zones proches de la surface :

- les surfaces structurales des plateaux calcaires se sont lentement érodées (de 10 à 20 mètres par 500 000 ans), initiant ainsi un recul des côtes (plurikilométrique pour la même durée) (Brulhet, 2005b),
- les vallées se sont creusées à des vitesses plus rapides : de l'ordre de 50 à 80 mètres par 500 000 ans (Brulhet, 2005b).

Ainsi, les zones d'alimentation des aquifères (recharges sur les plateaux) et les exutoires (notamment dans les vallées) se sont déplacés au fur et à mesure des modifications morphologiques et certaines parties de nappes profondes, sous couverture, sont devenues progressivement des nappes de surface.

Ces phénomènes modifient lentement les circulations hydrogéologiques. Les effets de ces modifications continues, pour les eaux de formation du Callovo-Oxfordien et des encaissants, ne sont sensibles que sur des durées importantes (plusieurs millions d'années), ces eaux restant à l'équilibre avec les phases solides (Brulhet, 2005b). En profondeur, l'ensemble des formations se trouve donc, depuis plusieurs millions d'années, dans un état d'équilibre chimique, stationnaire, contrôlé par les écoulements dans le système et les phases solides présentes.

### 3.2.4 Le champ géothermal naturel

L'état thermique des différentes formations est déterminé par le flux de chaleur d'origine crustale, considéré comme constant durant les derniers millions d'années, les propriétés thermiques des formations sédimentaires et les cycles de variations de température moyenne de surface qui se sont succédés depuis les dernières centaines de milliers d'années. Ces derniers s'amortissent rapidement en profondeur. Seuls, les cycles climatiques montrant les périodes les plus longues (cycles glaciaire-interglaciaire de 100 000 ans) ont eu un impact plus important, l'isotherme 0 °C pouvant descendre jusqu'à 300 m (cf. § 5.6.3). L'héritage des cycles passés, notamment du dernier maximum glaciaire, correspond aujourd'hui à quelques degrés à plus de 500 mètres (Andra, 2005a, fiche 14). Ainsi, la série sédimentaire montre actuellement, à l'aplomb du site de Meuse / Haute-Marne, une température de 10 °C à proximité de la surface (correspondant aux températures moyennes annuelles de surface), augmentant jusqu'à 22 °C dans le Callovo-Oxfordien et 28 °C à la base du Dogger (Figure 3.2.9).

Le gradient moyen est de 2,3 °C/100 m (Bauer, 2005) et (Andra, 2005a, fiche 16). Homogène sur l'ensemble de la zone de transposition, il est sensiblement plus faible que celui observé ailleurs dans le bassin, de l'ordre de 3,3 °C/100 m (BRGM & ELF Aquitaine, 1976). Les variations du gradient thermique avec la profondeur, déterminées essentiellement par les variations de conductivité thermique des formations, sont peu importantes. Dans le Callovo-Oxfordien, les variations d'argilosité (cf. § 3.3.1.4) sont également à l'origine de très faibles variations de ce gradient. Aucune variation brutale, généralement associée aux aquifères et à des circulations d'eaux importantes, n'est observée, en accord avec le schéma hydrogéologique du secteur caractérisé de manière générale par des écoulements lents.

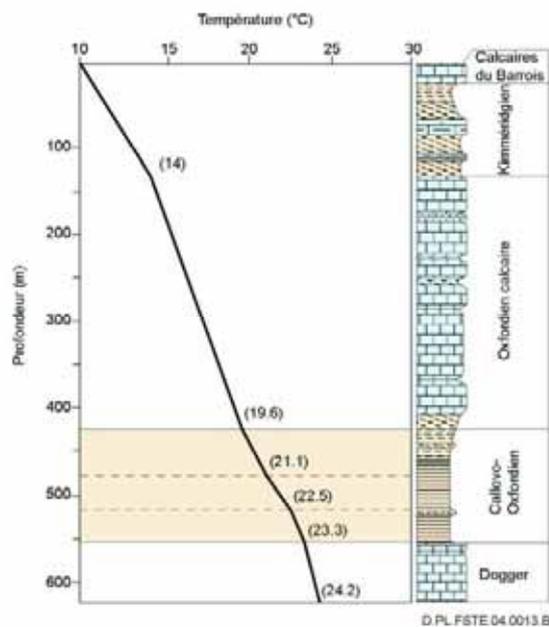


Figure 3.2.9 Profil des températures géothermales de la série sédimentaire sur le site de Meuse / Haute-Marne (Bauer, 2005)

### 3.2.5 Le champ de contrainte mécanique naturel

À l'occasion de la mise en place du régime compressif alpin, daté du Miocène (-23 Ma), un régime de contrainte orienté Ouest-Nord-Ouest/Est-Sud-Est s'installe sur toute la plaque ouest-européenne. Ce régime perdure jusqu'à aujourd'hui (Bergerat, 1985 ; Brulhet, 2005a) (Figure 3.2.10). Le fait que la région soit éloignée de plus de 350 kilomètres du front alpin et la lente cinétique des plaques expliquent la stabilité de ce régime. Il contrôle les contraintes horizontales qui s'exercent sur l'ensemble des formations du secteur, déterminant ainsi une anisotropie de ces contraintes horizontales avec une contrainte majeure orientée N155° (Andra, 2005h, chapitre 9) et une contrainte mineure, perpendiculaire. Ces orientations sont cohérentes avec les observations réalisées sur la France (Grellet *et al.*, 1993) et à l'échelle de la plaque ouest-européenne (Rebaï *et al.*, 1992). Le rapport entre les amplitudes de ces deux contraintes (contrainte majeure/contrainte mineure) est de l'ordre de 1 à 1,2 pour la partie centrale du Callovo-Oxfordien et sensiblement plus élevé dans les encaissants. Dans la série sédimentaire, la composante verticale de la contrainte correspond au poids des terrains sus-jacents jusqu'à la surface. Cette dernière est proche de la contrainte horizontale mineure. Cette valeur est de l'ordre de 12 MPa pour le milieu du Callovo-Oxfordien à l'aplomb du laboratoire souterrain de recherche (profondeur de 500 m).

Cet état de contrainte doit rester pérenne à l'échelle du prochain million d'années. En effet, si au fur et à mesure de l'érosion des terrains superficiels, les valeurs des contraintes se modifient progressivement, l'orientation générale du champ de contrainte reste identique pour une même formation.

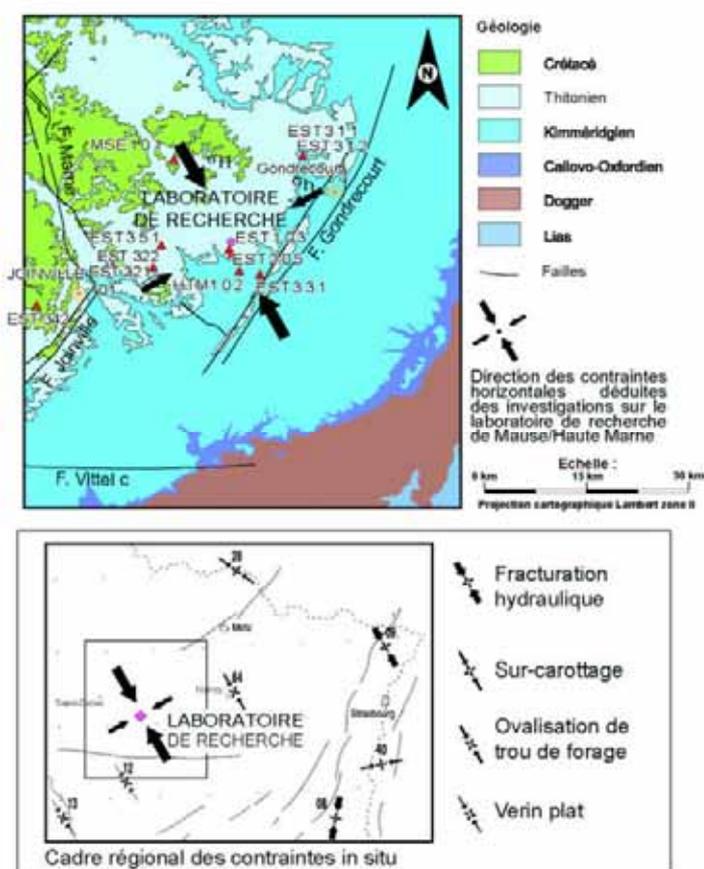


Figure 3.2.10 Orientation de l'état de contrainte mécanique actuel sur le secteur de Meuse / Haute-Marne (Andra, 2005h ; Grellet *et al.*, 1993)

### 3.3 Les différentes formations géologiques

La section précédente a permis de décrire le cadre général géologique et phénoménologique de la série sédimentaire, d'abord à l'échelle du bassin de Paris, puis à celle du secteur. Cette section présente plus particulièrement les caractéristiques de chacune des formations à l'état actuel. La couche du Callovo-Oxfordien est d'abord traitée (cf. § 3.3.1), puis respectivement l'encaissant sous-jacent, le Dogger (cf. § 3.3.2.1) et l'encaissant sus-jacent, l'Oxfordien carbonaté (cf. § 3.3.2.2). Enfin, les formations de surface sont décrites, les Marnes du Kimméridgien et les Calcaires du Barrois (cf. § 3.3.2.3).

#### 3.3.1 La couche du Callovo-Oxfordien

##### 3.3.1.1 La géométrie de la couche

Les argilites du Callovo-Oxfordien forment une couche à dominante argileuse homogène dont le toit est situé à 420 mètres de profondeur à l'aplomb du laboratoire souterrain. De par le pendage des couches vers le Nord-Ouest, cette profondeur augmente progressivement pour atteindre plus de 600 mètres à une quinzaine de kilomètres vers le Nord (Figure 3.3.1, Figure 3.3.2). Parallèlement, l'épaisseur de la couche varie de 130 mètres à 160 mètres environ du Sud vers le Nord-Ouest. Les données de géophysique sismique et les corrélations entre forages montrent que cette variation est progressive à l'échelle du secteur, et ceci de façon cohérente avec la topographie initiale, peu contrastée, ayant déterminé la sédimentation de cette formation, il y a 155 millions d'années environ (Figure 3.3.3) (Elion, 2005).

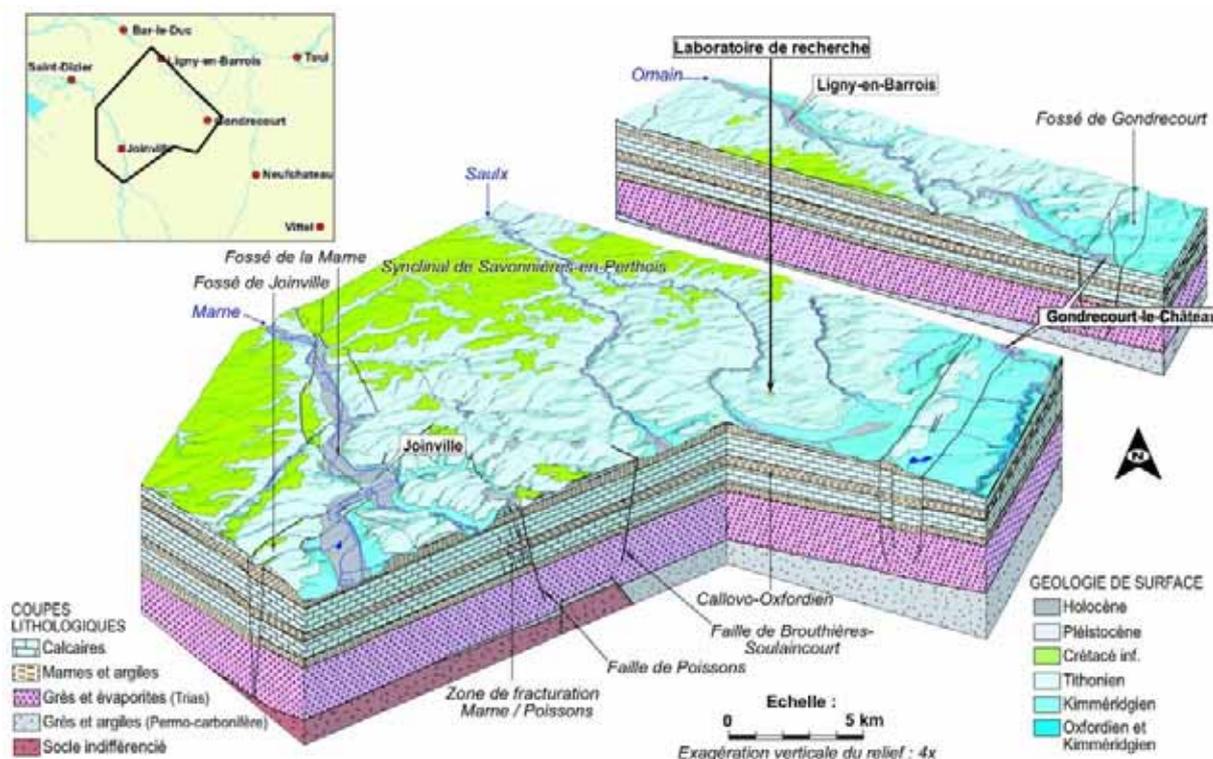


Figure 3.3.1 Géométrie de la série sédimentaire sur le secteur de Meuse / Haute-Marne

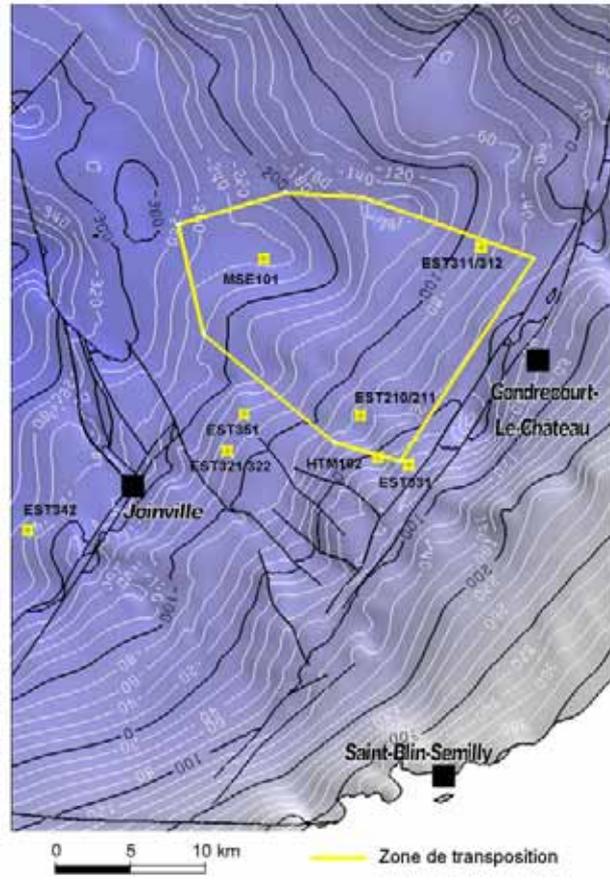


Figure 3.3.2 Isohypses du toit du Callovo-Oxfordien sur le secteur de Meuse / Haute-Marne (en m NGF)

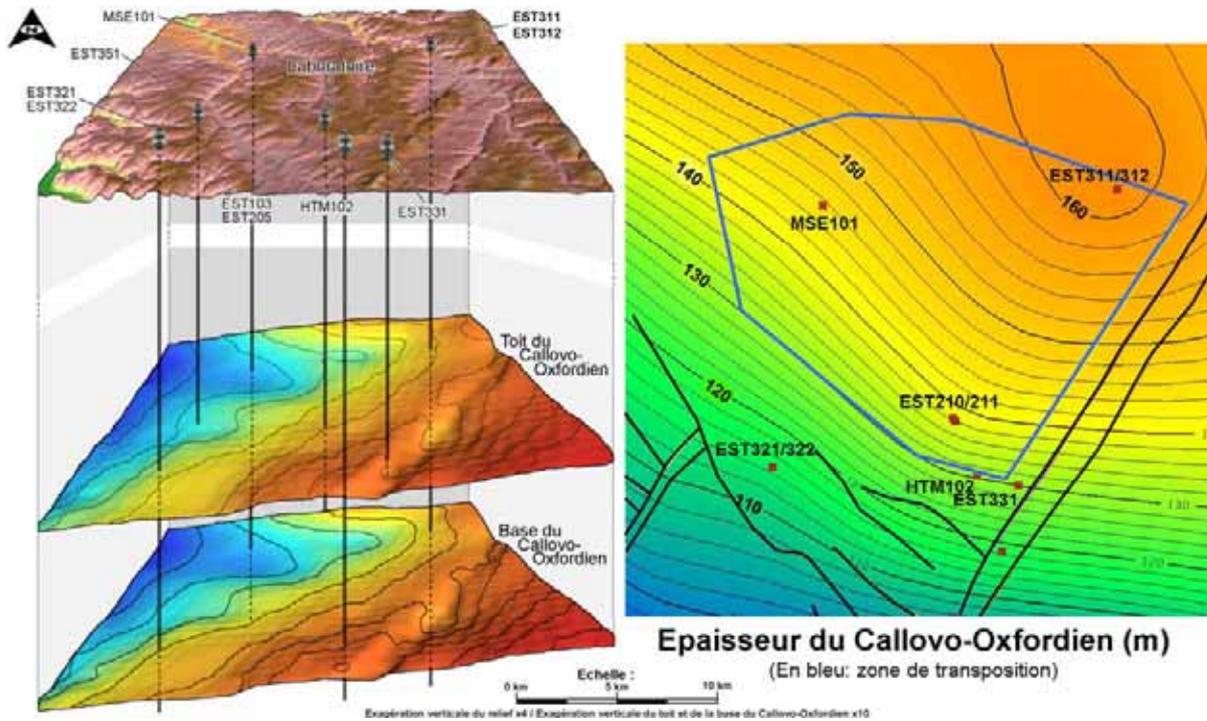


Figure 3.3.3 Épaisseur du Callovo-Oxfordien sur le secteur de Meuse / Haute-Marne (à droite) déterminées à partir des isohypses du toit et du mur de la formation (à gauche)

### 3.3.1.2 Les principales phases minérales et l'architecture interne

La couche s'est déposée sous une profondeur d'eau de l'ordre de la centaine de mètres durant les périodes de haut niveau marin, dans un milieu marin ouvert et calme (Guillocheau *et al.*, 2002). Les zones émergées les plus proches se situent dans le massif « Londres-Brabant », actuellement les Ardennes (Pellenard *et al.*, 1999).

Cet éloignement des sources d'apports explique la granulométrie fine des constituants. Le Callovo-Oxfordien montre trois phases minéralogiques principales : une phase argileuse dominante (illite et interstratifiés illite/smectite), une phase carbonatée (calcite essentiellement, avec quelques pourcents de dolomie) et une phase quartzeuse (de faible granulométrie : silts). Ces trois phases principales sont accompagnées de phases dites accessoires (pyrite notamment), en quantité massique inférieure à quelques pourcents (Elion, 2005) (Figure 3.3.4).

Verticalement, les variations progressives des proportions des phases minéralogiques principales s'organisent en trois séquences sédimentaires décimétriques qui sont l'expression de faibles variations cycliques du niveau marin relatif au moment du dépôt de la couche (cycles transgressifs-régressifs d'une durée unitaire de l'ordre de 2 à 3 Ma). Les limites des séquences sont définies sans ambiguïté sur le secteur (Figure 3.3.4) :

- la séquence inférieure repose directement sur les carbonates du Dogger, définissant ainsi la surface S0 ;
- les bases de la seconde et troisième séquence (surfaces S1 et S2) sont marquées par la présence de petits niveaux carbonatés,
- enfin, le toit de la couche (surface S2b) correspond à un marqueur diagraphique qui se corrèle facilement d'un forage à l'autre.

Au sein de chaque séquence, les maxima d'inondation, correspondant aux profondeurs d'eau les plus importantes lors du dépôt des sédiments, se traduisent par un enrichissement en minéraux argileux. La partie centrale de la couche, autour du maximum d'inondation de la deuxième séquence (surface S1b, niveau étudié pour l'implantation d'un stockage), montre jusqu'à 60 % de ces minéraux. Ce niveau correspond également à un changement minéralogique dans la phase argileuse qui montre un passage d'interstratifiés illite-smectite de type I/S R=1 à la base à un type I/S R=0 vers le sommet. Ce changement, qui se produit sur quelques mètres, n'a pas une origine diagénétique mais il est à relier aux conditions de sédimentation : il traduit un déplacement des sources d'apport des sédiments en liaison avec les conditions de haut niveau marin régnant lors du dépôt (Pellenard *et al.*, 1999). La séquence supérieure montre une teneur en carbonates plus élevée. Ceux-ci s'expriment sous forme de nodules et de petits niveaux carbonatés décimétriques à métriques (Figure 3.3.4).

Latéralement, à l'échelle du secteur, ces séquences se retrouvent sur de grandes distances et ne montrent, pour chacune d'entre-elles, que des variations faibles de composition minéralogique (quelques %) (Figure 3.3.4). Ainsi, la seule tendance nette mise en évidence est un très léger enrichissement en quartz (5 à 10 %) lorsque l'on se déplace d'une quinzaine de kilomètres vers le Nord à partir du site (Elion, 2005). Il en est de même pour les variations d'épaisseur (quelques mètres) de chacune des séquences, qui sont très progressives. Seule, la séquence inférieure, contrôlée par la topographie du substratum de la couche, montre des variations d'épaisseur plus sensibles (de l'ordre d'une vingtaine de mètres sur le domaine considéré) (Figure 3.3.5 et Figure 3.3.6). Ce découpage permet également de contrôler, à l'échelle du secteur, les épaisseurs de garde de part et d'autre de la surface S1b, niveau étudié pour l'implantation d'un éventuel stockage. C'est sur la base de ces données que certains critères d'épaisseurs ont été retenus pour la définition de la zone de transposition (épaisseur totale de la couche, épaisseur de la garde supérieure – Encadré 3.2). La constance de ces séquences témoigne du contexte tectonique et sédimentaire calme de la période de dépôt. Ce contexte permet de prédire, sur le secteur, l'absence de hiatus de sédimentation d'une ampleur susceptible de perturber la continuité de la couche (Elion, 2005) et l'absence de lentilles sableuses (turbidites) au sein

de la couche, étant donné, en particulier, l'éloignement des sources d'apport (zones exondées), notamment en période de haut niveau marin (Elion, 2005).

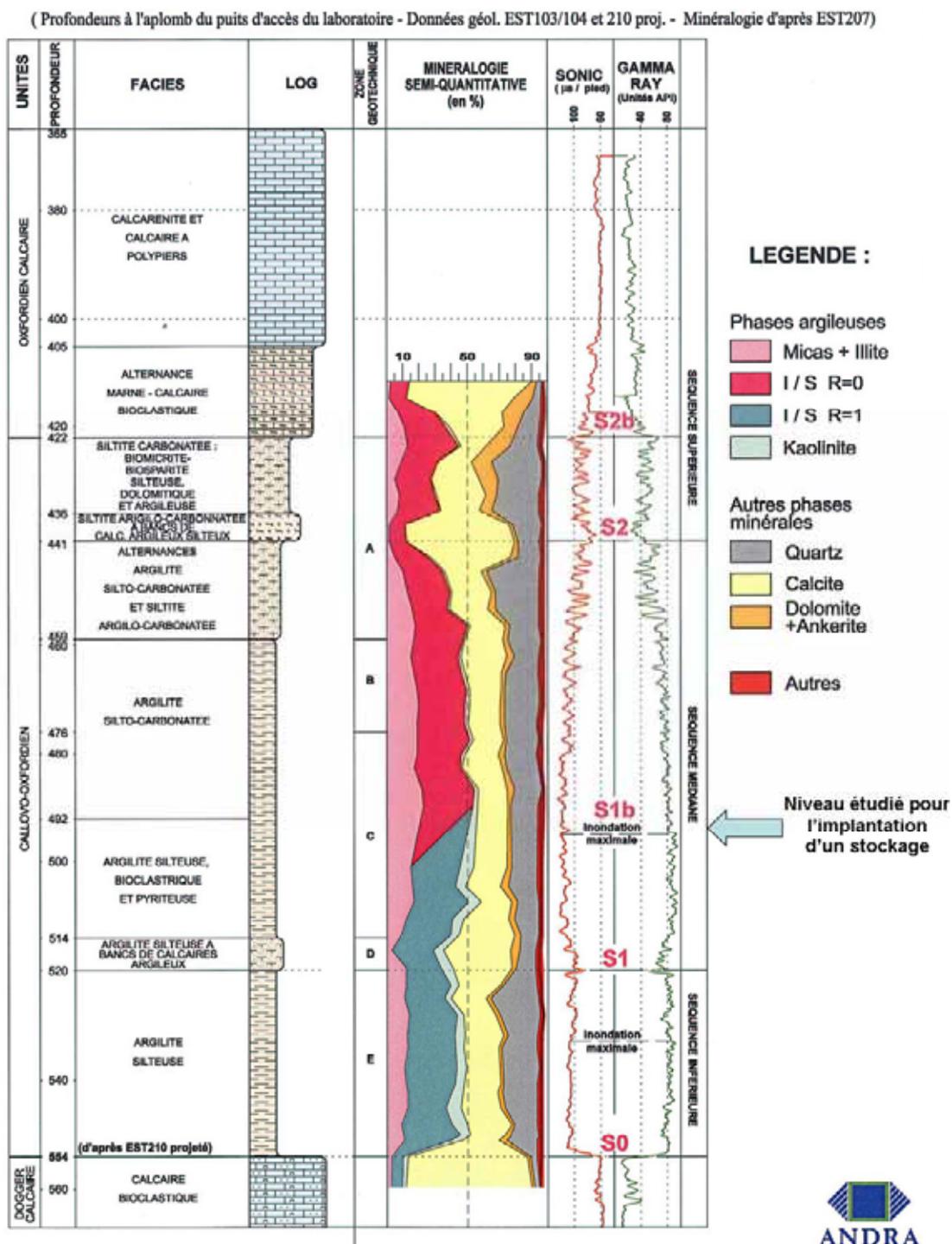


Figure 3.3.4 Organisation verticale du Callovo-Oxfordien à l'aplomb du site de Meuse / Haute-Marne

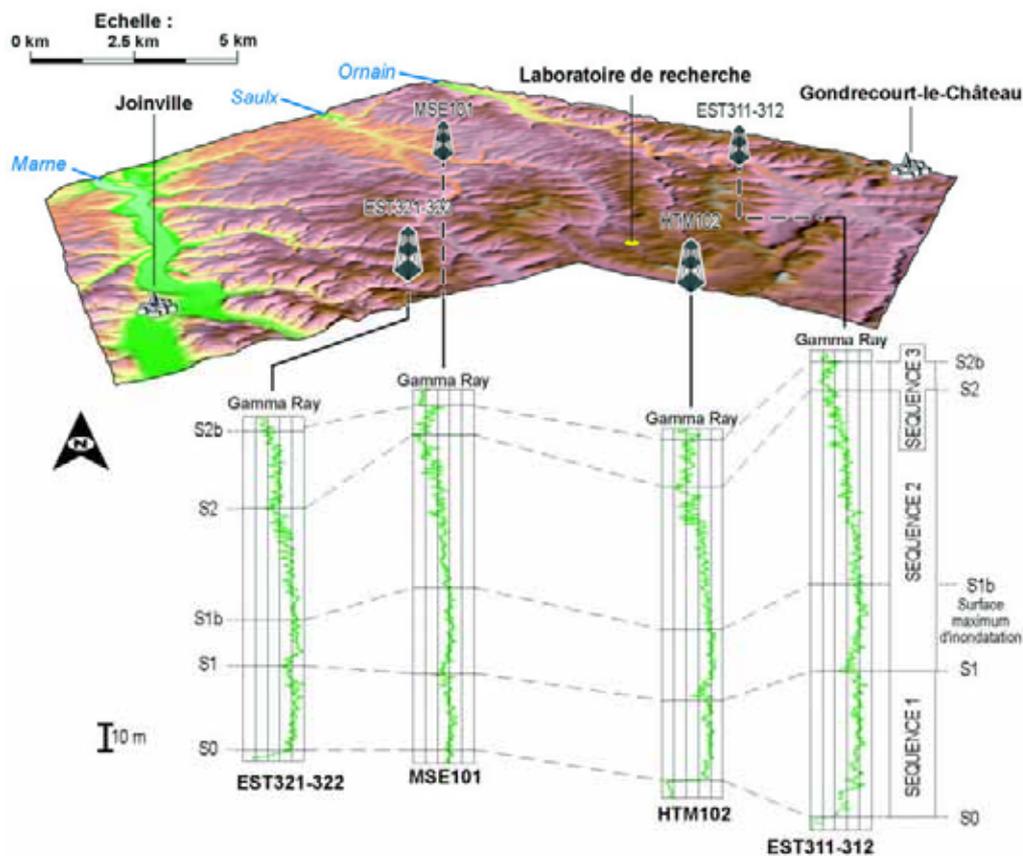


Figure 3.3.5 Homogénéité latérale du Callovo-Oxfordien sur le secteur de Meuse / Haute-Marne

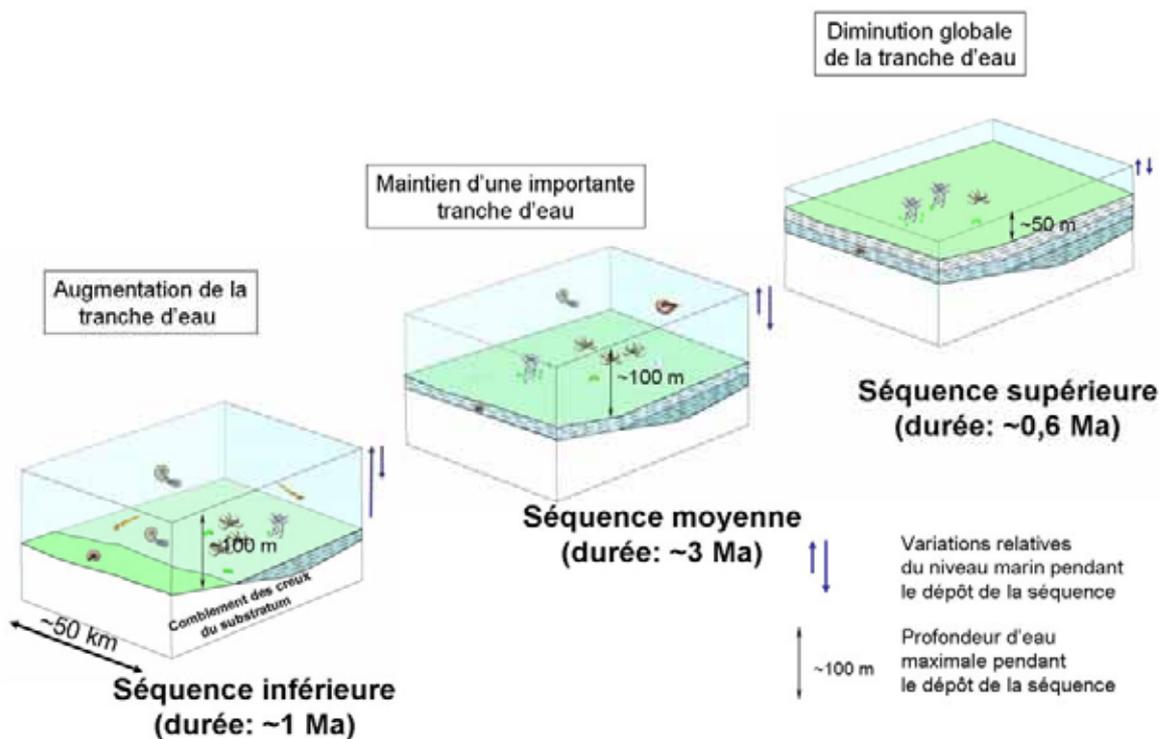


Figure 3.3.6 Représentation schématique du dépôt des 3 séquences du Callovo-Oxfordien

### 3.3.1.3 L'évolution de la couche depuis son dépôt

Entre la fin de son dépôt et la fin du Jurassique (de -150 à -135 Ma), la couche est recouverte par au moins 500 mètres de sédiments (Elion, 2005). Elle subit ensuite différents processus successifs, dits diagénétiques. Le premier de ces processus est la compaction progressive des sédiments, avec expulsion d'eau, sous le poids des dépôts ultérieurs. Interviennent ensuite des modifications physico-chimiques (dissolutions et précipitations minérales) pilotées par les augmentations de pression et de température liées à l'enfouissement ainsi que par la circulation des fluides. Ces processus n'ont eu que peu d'impact sur la couche durant la période étant donné les faibles profondeurs d'enfouissement atteintes par la couche à la fin du Jurassique (500 à 600 mètres).

Par la suite, les grands événements de l'histoire géologique de la fin du Crétacé (retrait de la mer) puis du Tertiaire (phase pyrénéenne, distension oligocène puis phase alpine) ont peu d'effets sur la formation. Ses caractéristiques actuelles sont acquises pour l'essentiel durant le Crétacé, ainsi que le montre la datation du dernier épisode diagénétique (antérieur à 100 Ma). Cet épisode, de faible intensité, a concerné certains échanges entre argiles et carbonates dans de très petits volumes de roche (Clauer *et al.*, 2001). Les phases initiales et notamment les minéraux argileux ne sont pas affectés par des modifications majeures de leur cristallochimie et de leur texture (Rousset & Clauer, 2003). Le caractère très limité des néo-formations sur ces minéraux rend difficile la détermination de la durée et l'extension de la phase diagénétique. Néanmoins, des durées de l'ordre de la dizaine de millions d'années sont avancées à partir d'études sur un niveau spécifique, enrichi en minéraux smectitiques (Rousset & Clauer, 2003). Les analyses isotopiques menées sur la phase carbonatée (notamment à partir des isotopes du Sr et du  $\delta^{13}\text{C}$  – Encadré 3.1) montrent des résultats situés dans les gammes de valeurs caractéristiques de l'eau de mer callovo-oxfordienne sur toute l'épaisseur du Callovo-Oxfordien (Lavastre, 2002 ; Maes, 2002) (Figure 3.3.7). De plus, les évolutions verticales des compositions isotopiques montrent une bonne corrélation avec les variations du niveau marin, telles que déduites des interprétations séquentielles. Il y a donc conservation de la signature marine originelle des ciments carbonatés, montrant bien le caractère limité de la diagenèse sur la fraction carbonatée. D'une manière générale, les phénomènes diagénétiques enregistrés par le Callovo-Oxfordien sont donc précoces, très discrets et d'extension régionale. Ils ne sont donc pas susceptibles d'être la cause d'hétérogénéités à l'échelle de la zone de transposition.

L'enfouissement supplémentaire qu'apportent les sédiments crétacés reste limité (de l'ordre de 300 mètres) compte tenu de la position du site sur la bordure du bassin. La température maximale atteinte par la couche reste faible, de l'ordre de 40 °C comme le montrent les analyses menées sur les différents marqueurs de température disponibles, et notamment l'étude de la maturité de la matière organique (Andra, 2005h, chapitre 11). Ces sédiments crétacés sont par la suite érodés durant le Tertiaire amenant ainsi la couche à la température observée actuellement (22 °C), et considérée comme stationnaire (cf. § 3.2.3.1). Ces niveaux de température et ces conditions d'enfouissement sont bien inférieurs à ceux nécessaires à des transformations minéralogiques des phases argileuses (par exemple la transformation des smectites en illites). Ces dernières ne s'initient, dans les bassins sédimentaires, qu'à des températures supérieures à 80 °C et ne deviennent sensibles qu'au-delà de 100 °C, correspondant, avec un gradient géothermal moyen de 3 °C/100 m à des profondeurs supérieures à 2 500 m (Chamley, 1989). De plus, les cinétiques de transformation restent lentes pour ces basses températures : la transformation totale de smectites en illites demanderait des durées de l'ordre de la centaine de millions d'années à 80 °C (Pytte & Reynolds, 1989).

Le Callovo-Oxfordien est donc une formation géologique formée il y a 155 millions d'années dans un contexte stable. Les transformations minéralogiques postérieures au dépôt de la couche sont des processus limités dans l'espace et précoces, antérieurs à 100 millions d'années, affectant essentiellement les ciments carbonatés. L'évolution thermique modérée de la couche durant son histoire n'a pas permis d'initier de transformations minéralogiques des phases argileuses (illitisation notamment).

Cette évolution diagénétique limitée ne remet pas en cause l'architecture initiale de la couche qui se présente donc comme un ensemble sédimentaire à la géométrie bien contrainte et homogène latéralement, permettant de retrouver sur de grandes surfaces les trois séquences de dépôt. Ces propriétés sont à l'origine, avec la prise en compte du comportement de la couche lors du creusement des ouvrages, (dépendant des propriétés mécaniques de la roche présentées ci-après), de la définition d'une zone correspondante au domaine géologiquement équivalent à celui du laboratoire souterrain, dite zone de transposition (Encadré 3.2).

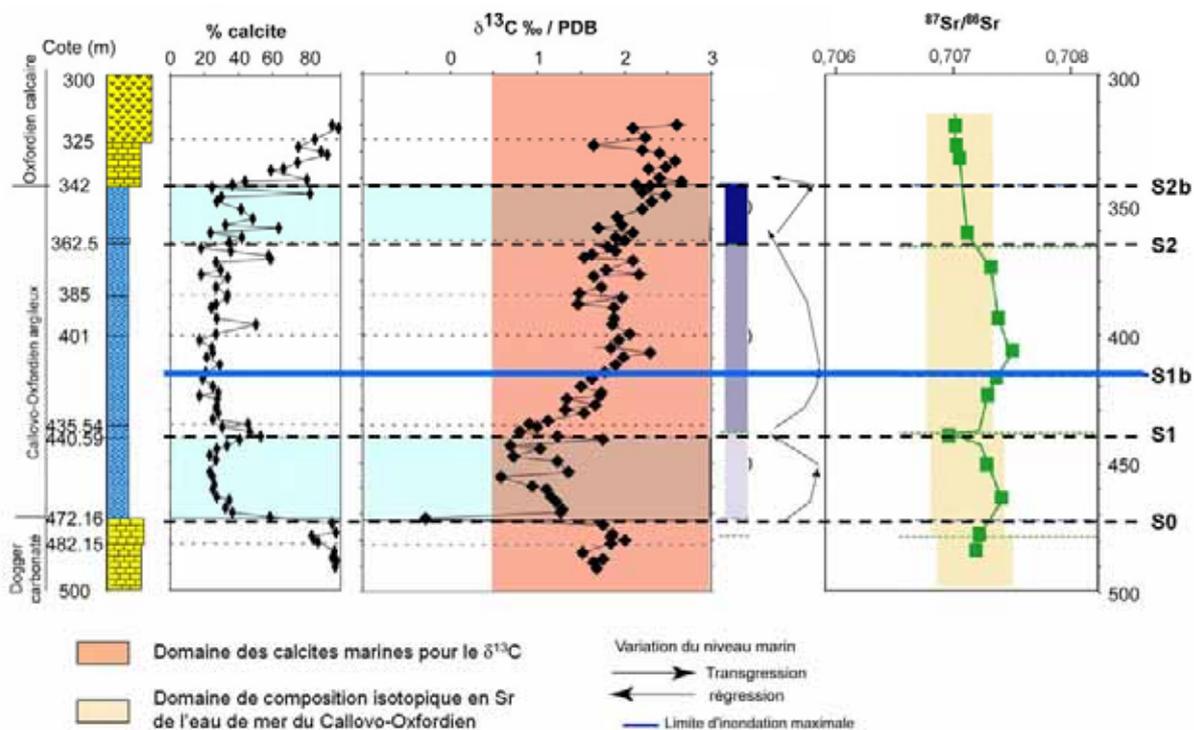


Figure 3.3.7 Teneurs en calcite, composition isotopique en Sr et  $\delta^{13}\text{C}$  de la calcite sur le forage HTM 102 (d'après (Lavastre, 2002 ; Maes, 2002) – Domaine des calcites marines pour  $\delta^{13}\text{C}$  selon (Podlaha et al., 1998), domaine de composition isotopique en Sr de l'eau de mer callovo-oxfordienne selon (Koepnick et al., 1990))

### Encadré 3.1 Les traceurs géochimiques et isotopiques : Principes et utilisations (1/2)

Les traceurs chimiques et isotopiques naturels mesurés dans l'eau interstitielle des formations géologiques et/ou dans les phases minérales apportent des informations sur le comportement des solutés naturellement présents dans ces formations, permettent de valider en grand les paramètres de transport comme les vitesses, ou de préciser, dans le temps et dans l'espace, les interactions eaux-roches.

**L'étude des traceurs naturels anioniques** (chlore et brome) dans l'eau permet d'appréhender les mouvements de solutés dans les formations. En effet, ces derniers interagissent peu avec la matrice minérale et montrent un comportement identique face aux différents processus. Le rapport (Cl/Br) est un indicateur de source et d'évolution de l'eau : il est d'environ 300 pour l'eau de mer et de plusieurs milliers pour la dissolution des évaporites.

Les rapports entre différents **isotopes stables d'un même élément** repositionnent l'échantillon analysé par rapport à un environnement initial, dit standard (le rapport de fractionnement isotopique étant connu pour ce dernier). Le rapport isotopique entre deux isotopes stables d'un même élément est en général ramené au rapport isotopique du standard selon la formule (ici pour les deux isotopes stables du chlore) :

$$\delta^{37}Cl = \left( \frac{^{37}Cl/^{35}Cl_{éch.}}{^{37}Cl/^{35}Cl_{std}} - 1 \right) * 1000$$

Ainsi, les concentrations en isotopes stables de l'eau ( $\delta^2H$ , calculé à partir du rapport  $^2H/H$  et  $\delta^{18}O$ , déterminé à partir du rapport  $^{18}O/^{16}O$ ) aident à la détermination de l'origine marine ou météorique de celle-ci. Il en est de même pour les analyses des isotopes du chlore qui, de plus, du fait des différences de mobilité des deux isotopes stables ( $^{37}Cl$  et  $^{35}Cl$ ), permettent d'identifier les processus de transport, notamment les processus diffusifs.

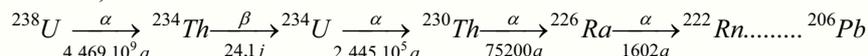
Plus particulièrement sur **les phases solides**, les concentrations en isotopes du Strontium ( $^{87}Sr/^{86}Sr$ ) et du Carbone ( $^{13}C/^{12}C$ ) permettent de déterminer les milieux de formation des minéraux et d'évaluer les interactions eaux-roches (phénomènes de diagenèse).

Il est possible de mener les mêmes types d'analyses **sur les gaz issus des échantillons** :

- les isotopes stables de la vapeur d'eau donnent une mesure indépendante de celle sur l'eau de formation (parfois difficile à extraire pour les milieux argileux),
- le carbone sur le  $CO_2$  dissous est un indicateur de l'équilibre de l'eau avec les phases carbonatées par comparaison avec le  $\delta^{13}C$  déterminé sur ces phases carbonatées présentes,
- la caractérisation des isotopes des alcanes permet de déterminer l'origine et la maturité des gaz présents dans les échantillons,
- les gaz rares, hélium et surtout argon, sont produits de manière plus ou moins continue dans la roche. L'étude des profils de répartition de ces gaz rares contribue à caractérisation du régime de transport en fonction des accumulations ou des dilutions constatées.

L'étude des **marqueurs isotopiques radioactifs naturels** permet d'accéder à des indications de temps de séjour.

C'est le cas de l'étude des déséquilibres radioactifs de la chaîne de décroissance radioactive de  $^{238}U$  (présentée ci-dessous).



Le principe repose sur le calcul de rapport d'activités entre deux éléments de la chaîne, qui, en condition d'équilibre (milieu clos) doit être égal à 1. Un déséquilibre est un indicateur de fractionnement montrant une perturbation du milieu. Cette étude met en évidence les évolutions récentes du système (de l'ordre de 800 000 ans).

### ***Les traceurs géochimiques et isotopiques : Principes et utilisations (2/2)***

L'étude de certains **radionucléides naturels ou artificiels** donne accès à une datation absolue des eaux, fondée sur la décroissance radioactive. Un large spectre temporel est couvert actuellement par les techniques disponibles ou encore en cours de développement.

- Le **tritium** est un isotope radioactif de l'hydrogène, avec une durée de vie de 12 ans environ. Il n'existe pas à l'état naturel et sa présence dans l'environnement est due aux essais nucléaires des années 1950-1960. Il est utilisé pour la datation d'eaux récentes, infiltrées depuis moins de 50 ans.
- Le **carbone-14**, le **chlore-36** et le **krypton-81** sont trois isotopes radioactifs produits naturellement dans l'atmosphère en quantités plus ou moins constantes (ou connues) dans le temps. Ces isotopes s'infiltrent avec les eaux pluviales dans les nappes souterraines, où ils ne sont plus en contact avec l'atmosphère. À partir de la connaissance de la durée de vie de ces isotopes, il devient alors possible de mesurer le temps de résidence des eaux. Le <sup>14</sup>C a une durée de vie de 5 730 années autorisant la datation d'eaux jusqu'à 40 000 ans environ. Les longues durées de vie du <sup>36</sup>Cl (300 000 ans) et du <sup>81</sup>Kr (229 000 ans) permettent de déterminer des temps de résidence d'eaux de quelques dizaines de milliers d'années à un million d'années.

#### **3.3.1.4 Les propriétés mécaniques et thermiques**

L'architecture interne de la couche conditionne le zonage rhéologique de celle-ci, et par voie de conséquence son comportement mécanique. Ce zonage est fondé sur l'argilosité de la formation et il est donc intimement lié au découpage séquentiel décrit ci-dessus (cf. § 3.3.1.2). Latéralement, le découpage séquentiel et ses corrélations permettent ainsi d'extrapoler ce zonage géomécanique, en cohérence avec les variations lithologiques, sur l'ensemble de la zone de transposition.

On distingue verticalement, en liaison avec le pourcentage d'argile de la roche, trois zones ayant des différences marquées de comportement mécanique (Figure 3.3.4) (Andra, 2005h, chapitre 25).

- ✓ La zone supérieure (zone « A ») a une épaisseur de l'ordre de 37 mètres à l'aplomb du site. Elle présente un comportement moyen plus raide que les zones sous-jacentes. L'alternance de bancs plus ou moins carbonatés induit une grande dispersion des propriétés mécaniques. La résistance et le module de déformation ont des valeurs moyennes respectives de 27 MPa et 6 000 MPa.
- ✓ L'épaisseur de la zone médiane (zones « B/C ») est environ 55 mètres. Cette zone correspond à une augmentation progressive de la déformabilité (diminution de la raideur) et une diminution progressive de la résistance du haut et du bas de la zone vers le centre, corollairement à l'augmentation de l'argilosité. La zone la plus déformable se situe au niveau d'implantation des ouvrages du stockage. Les propriétés moyennes de la zone sont de 4 500 MPa pour le module de déformation et de 21 MPa pour la résistance à la compression. Les vitesses de fluage à court terme (premières semaines à premiers mois) sont estimées à  $10^{-2}$  à  $10^{-3}$  an<sup>-1</sup>. À plus long terme, au-delà de la première année, ces vitesses sont de  $10^{-4}$  an<sup>-1</sup>. Dans cette zone, ces vitesses sont environ 4 fois plus élevées que dans la zone « A ».
- ✓ La zone inférieure (zones « D/E »), d'une épaisseur de 40 mètres, a une résistance mécanique moyenne de l'ordre de 21 MPa et un module de déformation de l'ordre de 6 000 à 7 000 MPa. L'homogénéité de la sédimentation dans cette zone se traduit par une faible variabilité des propriétés physiques (densité, porosité) et une légère variabilité des paramètres mécaniques en fonction de la variabilité du taux de carbonates (comportement localement plus raide). Cette variabilité est observée vers le sommet de cette zone (intervalle carbonaté séparant la séquence inférieure de la séquence médiane).

Sous l'effet de la gravité, la sédimentation des argilites induit une orientation préférentielle des feuillets argileux. Elle forme par conséquent une stratification de la structure matricielle, qui est à l'origine d'une légère anisotropie de ces propriétés mécaniques.

La conductivité thermique du Callovo-Oxfordien est anisotrope, du fait de la stratification (de l'ordre de 1,3 à 1,9  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  en vertical et 1,9 à 2,7  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  en horizontal). Elle ne varie que faiblement sur la hauteur de la couche, en liaison également avec l'argilosité et donc le zonage géomécanique.

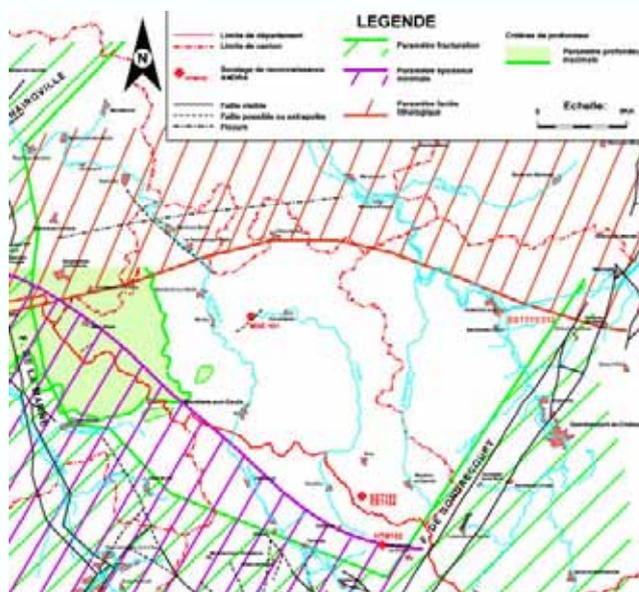
### Encadré 3.2 *La définition de la zone de transposition autour du site de Meuse / Haute-Marne*

La zone de transposition est le résultat d'une démarche qui consiste à rechercher, sur le secteur étudié, un domaine géographique que l'on puisse considérer géologiquement équivalent au site du laboratoire souterrain, tant du point de vue de la géométrie et des propriétés de confinement de la formation du Callovo-Oxfordien que des caractéristiques des perturbations qu'engendrerait un stockage sur cette couche. Son tracé s'appuie sur les catégories de paramètres suivants :

- l'épaisseur de la couche,
- la préservation des propriétés physico-chimiques de la formation, qui sont le résultat des conditions lors du dépôt des sédiments et de leur évolution ultérieure (diagenèse, tectonique), dont l'évaluation s'appuie sur (i) la variabilité lithologique, verticale (succession verticale des cortèges minéralogiques et notamment des minéraux argileux) et horizontale (modification des proportions relatives des grands constituants de la couche) et (ii) l'éloignement des zones faillées,
- Les facteurs contrôlant l'importance des perturbations autour des ouvrages souterrains (résistance intrinsèque de la roche, amplitude des contraintes, ....).

Ces paramètres permettent de définir une zone limitée (cf. figure ci-dessous) (Andra, 2005h, chapitres 21 et 28) :

- au Sud par l'épaisseur minimum de 130 m (zone dans laquelle, par ailleurs, il y existe toujours au moins 65 m de formation au-dessus de la surface S1b, niveau étudié pour l'implantation d'un stockage),
- à l'Est par le fossé de Gondrecourt, en se plaçant à une distance kilométrique de ce dernier,
- au Nord par une ligne matérialisant schématiquement les variations de faciès attendues dans la couche (notamment l'enrichissement en quartz), sur la base des contrôles aux forages MSE101 et EST311,
- à l'Ouest par un critère de profondeur maximum de la couche (environ 630 m au niveau S1b), contrôlant l'extension des perturbations notamment mécaniques du creusement des ouvrages, qui apparaît plus restrictif que le critère visant à se mettre à l'écart des failles de La Marne.



*Définition de la zone de transposition*

La zone ainsi définie, d'une emprise d'environ 250 km<sup>2</sup>, reste schématique, certaines limites (au nord notamment) s'appuyant sur des critères plus qualitatifs que quantitatifs. Elle permet cependant, notamment étant donné la constance attendue des propriétés du Callovo-Oxfordien au sein de celle-ci, de préciser la zone d'intérêt pour l'étude d'un stockage en retenant des hypothèses prudentes.

### 3.3.1.5 Les propriétés texturales et la porosité

La composition minéralogique initiale et l'histoire diagénétique des argilites du Callovo-Oxfordien font que ses caractéristiques minéralogiques et texturales sont acquises depuis plus de 100 Ma.

Le volume poreux est conditionné par l'arrangement des trois principales phases minérales (Andra, 2005h, chapitre 12) :

- les phases argileuses (majoritaires – 60 % au maximum) se présentent sous forme d'agrégats de minéraux argileux (plaquettes de formes plus ou moins régulières) de taille de l'ordre de plusieurs dizaines à la centaine de micromètres de longueur et de quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur. Ces agrégats jouent le rôle de matrice et s'organisent grossièrement en lits flexueux, selon la stratification ;
- les éléments détritiques quartzeux, de petite taille (5 à 10 micromètres) sont répartis de manière homogène dans cette matrice ;
- la phase carbonatée se présente sous forme d'éléments de tailles variables, parfois assez gros (jusqu'à millimétriques) correspondant à des bioclastes et des cristaux automorphes résultant de néoformations secondaires à la suite des phénomènes diagénétiques.

Du fait des proportions relatives des phases argileuses et des autres éléments, ces derniers ne sont pas jointifs et apparaissent dispersés au sein de la matrice.

Cet arrangement détermine dans la roche deux types de porosités (Andra, 2005h, chapitre 12) (Figure 3.3.8, Figure 3.3.9) :

- la porosité interne à la matrice argileuse (autour des agrégats et des particules d'argiles) qui concerne les tailles de pores infra micrométriques et correspondant à la méso- et à la microporosité (90 % du volume poreux),
- la porosité à l'interface entre la matrice argileuse et les particules quartzeuses et les bioclastes qui concerne des tailles de pores micrométriques et des tailles de pores infra micrométriques pour les carbonates néoformés, et correspondant à la macroporosité (10 % du volume poreux).

Le volume poreux total ainsi défini est de l'ordre de 18 % du volume total de la roche. Cette porosité induit une tortuosité importante, liée à l'arrangement des agrégats argileux entre eux.

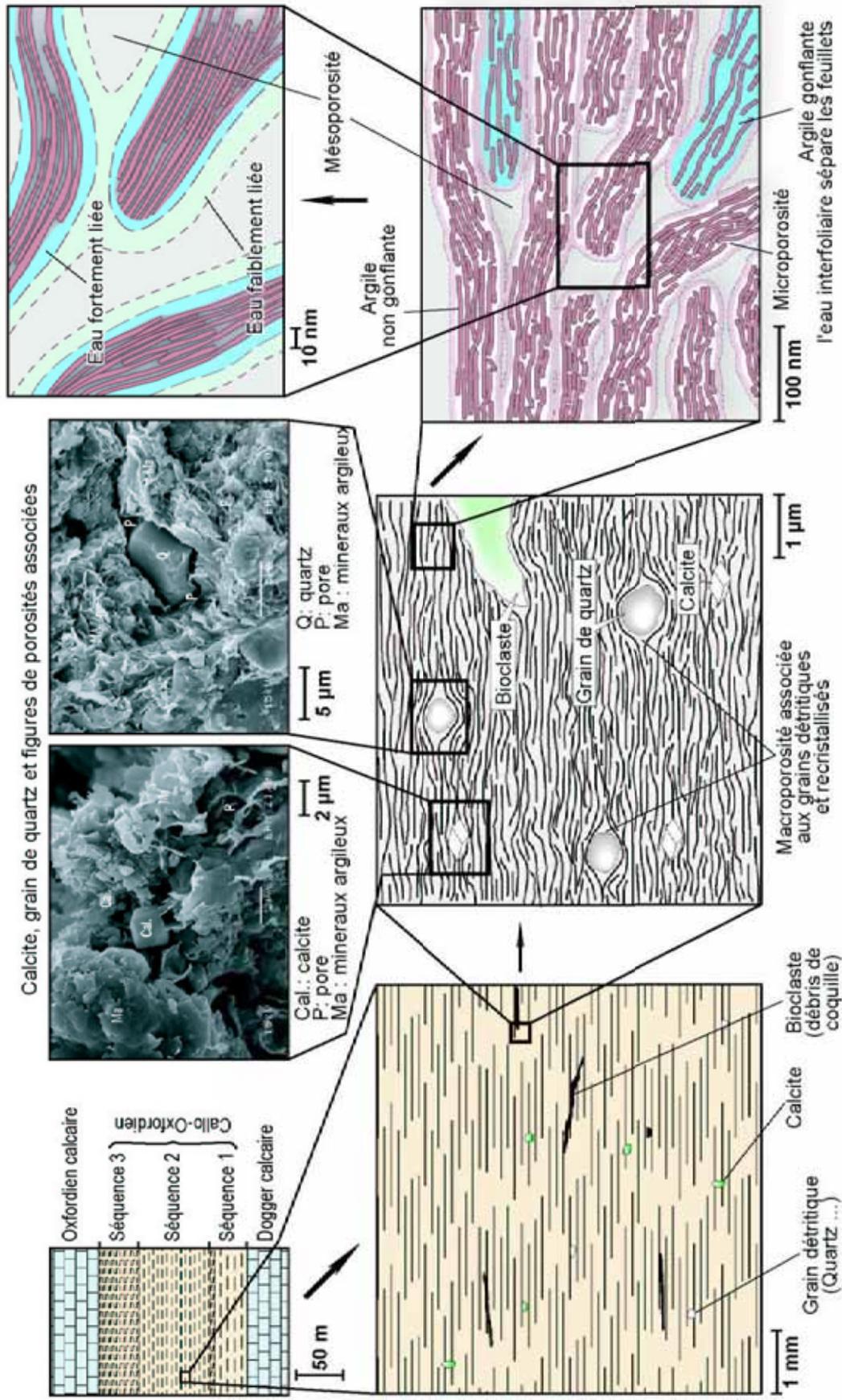


Figure 3.3.8 Schémas de la texture et de la porosité des argilites du Callovo-Oxfordien

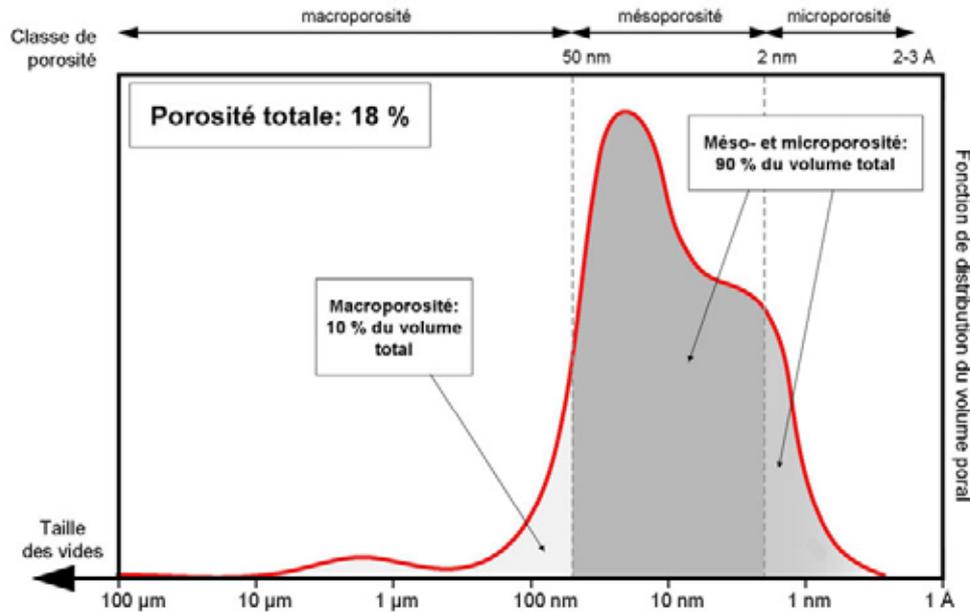


Figure 3.3.9 *Modèle conceptuel de la porosité des argilites du Callovo-Oxfordien (d'après les mesures de porosimétrie mercure et les courbes d'adsorption d'azote) (Andra, 2005h, chapitre 12)*

### 3.3.1.6 L'eau interstitielle et les écoulements dans le Callovo-Oxfordien

D'une manière générale, l'eau se structure (*i.e.* s'organise en réseau) au voisinage des surfaces minérales et plus particulièrement près de celles portant une charge électrique résiduelle. Dans un milieu poreux, on définit ainsi une eau liée, et donc non mobile, et une eau libre, non affectée par cet effet. (Encadré 3.3)

Les particules d'argiles portent une charge permanente et ont donc un effet important sur la structuration de l'eau à leur voisinage (Andra, 2005h, chapitre 12), contrairement au quartz ou aux carbonates, qui présentent des charges permanentes de surface beaucoup plus faibles.

Autour des particules argileuses, il en résulte un film d'eau liée, qui peut boucher certains pores (« goulet électro-chimique »). Pour un sédiment tel que les argilites du Callovo-Oxfordien, la taille des pores ainsi obstrués par ce « goulet électro-chimique » est de l'ordre de 10 à 20 nanomètres (Andra, 2005h, chapitre 12) (Figure 3.3.8). La porosité de la roche se distribuant essentiellement dans la matrice argileuse, la proportion d'eau liée, au contact des particules, est importante. Elle correspond à environ 50 % de l'eau contenue dans la porosité totale (Altmann & Coelho, 2005 ; Altmann & Jacquot, 2005). Cette eau liée ne participe pas aux écoulements au sein de la roche.

Ces propriétés texturales confèrent aux argilites du Callovo-Oxfordien une faible perméabilité sur toute son épaisseur (Altmann & Coelho, 2005). Les différentes mesures réalisées, tant sur échantillons qu'en forages, donnent des valeurs cohérentes comprises entre quelques  $10^{-14}$  m.s<sup>-1</sup> et quelques  $10^{-13}$  m.s<sup>-1</sup> (Altmann & Coelho, 2005). Il est à noter que les valeurs de perméabilité les plus faibles (quelques  $10^{-14}$  m.s<sup>-1</sup>) sont déduites des analyses des remontées de pression dans les sondes EPG qui permettent d'avoir accès à des valeurs fiables, concernant un volume de roche significatif. La valeur la plus élevée déduite d'une mesure EPG est de l'ordre de  $4 \cdot 10^{-13}$  m.s<sup>-1</sup> (Andra, 2005h, chapitre 16). Cette gamme de valeurs est par ailleurs cohérente avec les premiers résultats des expérimentations en cours sur le site de Meuse / Haute-Marne (expérimentations PEP : mesure de pression interstitielle et de perméabilité des argilites et REP : suivi de la réponse des argilites au creusement du puits). La remise en perspective de toutes les mesures ne permet pas de mettre en évidence une réelle anisotropie de

perméabilité. Cette dernière, qui serait la conséquence de l'organisation des minéraux argileux, héritée des conditions de sédimentation, s'inscrirait donc la fourchette ci-dessus. Ceci est par ailleurs cohérent avec certaines mesures spécifiques sur échantillons, réalisées au gaz, qui montrent une anisotropie d'un facteur 10 entre la perméabilité horizontale et verticale (Zhang & Rothfuchs, 2004).

Cette faible perméabilité du Callovo-Oxfordien, associée aux faibles gradients de charge de part et d'autre de la formation, contrôle des écoulements verticaux lents (Encadré 3.4). Les vitesses liées à ces écoulements sont dans le détail assez différentes, du fait de la structure porale du milieu. De même, certains pores ne sont pas connectés et ne peuvent participer à cet écoulement. Aussi, on définit une porosité dite cinématique, qui est une fraction de la porosité totale, permettant, macroscopiquement, de calculer une vitesse moyenne d'écoulement dans la direction du gradient de charge. Pour le Callovo-Oxfordien, cette porosité cinématique correspond à la fraction d'eau libre dans la roche, soit 9 % environ, correspondant à la moitié de la porosité totale. La très faible perméabilité détermine des vitesses moyennes d'écoulement au sein de la couche (vitesse de Darcy, Encadré 3.4) de l'ordre de 3 cm par 100 000 ans, ce qui correspond à une vitesse de transfert de l'eau d'environ 30 cm par 100 000 ans compte tenu de la porosité cinématique.

### Encadré 3.3 La structuration de l'eau dans les argilites du Callovo-Oxfordien

Dans un milieu poreux, des interactions existent entre les différents fluides non miscibles présents dans le volume poral, mais également entre les fluides et les différents solides constituant la matrice solide.

Dans un milieu poreux saturé en eau, état initial des couches géologiques traversées par les différents ouvrages du stockage, on peut distinguer typiquement les états de structuration suivants de l'eau (figure ci-après) (Andra, 2005h, chapitre 12) :

- l'eau libre, qui n'est pas significativement affectée par les interactions entre l'eau et la matrice rocheuse. Cette eau entre en mouvement sous l'effet des seules forces gravitaires. La porosité qu'elle occupe est appelée porosité cinématique. Dans cette porosité, la taille des pores est supérieure à des dimensions caractéristiques de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-8}$  m. Dans des milieux granulaires, tels que les graviers ou les sables, dont tous les pores sont de tailles importantes, la porosité cinématique est assimilable à la porosité totale et les forces autres que les forces gravitaires (capillaires, Van der Waals, ...) peuvent être négligées, y compris les effets de surface des grains constitutifs de ces milieux qui ne sont généralement pas chargés électriquement ;
- l'eau faiblement liée, se situe dans des pores de petite taille dans lesquels les forces capillaires sont supérieures aux forces gravitaires. C'est pourquoi cette eau est également appelée eau capillaire. Typiquement la taille des pores est comprise entre  $2 \cdot 10^{-8}$  m et  $3 \cdot 10^{-9}$  m. Cette eau ne peut être extraite du milieu qu'en le désaturant. Au fur et à mesure de la désaturation, ce sont des pores de taille de plus en plus faible qui se désaturent. Les succions nécessaires à cette extraction deviennent de plus en plus élevées au cours du processus, car la pression capillaire est inversement proportionnelle au rayon du pore (Encadré 6.5 et Encadré 6.6). Ce type d'eau est présent dans les milieux cimentaire, diagénétisé ou cristallin (grès et calcaire fin, granite, ...), mais également dans les argiles ;
- l'eau fortement liée, pour laquelle les forces capillaires sont plus faibles que les forces électrochimiques proches des surfaces de certains minéraux comme les argiles. Ces forces agissent uniquement à des distances très faibles, de l'ordre de quelques nanomètres. Elles se développent principalement dans les argiles et nécessitent des succions extrêmement importantes pour mobiliser l'eau qu'elles maintiennent à la surface des feuillets d'argiles. Dans les argilites du Callovo-Oxfordien il faut des succions de l'ordre de quelques dizaines de MPa pour mobiliser cette eau ;
- l'eau faisant partie intégrante des minéraux argileux. Il s'agit de l'eau structurale (indépendante de l'état d'hydratation) et de l'eau interfoliaire. Pour certaines argiles, cette dernière peut être mobile. C'est le cas des bentonites qui, lorsqu'elles sont désaturées, n'ont pas la même composition chimique que lorsqu'elles sont saturées, ce qui participe, en partie, à leur propriété de gonflement. Pour les argilites du Callovo-Oxfordien, ces eaux ne peuvent pas être enlevées à la matrice solide et ne peuvent donc pas participer à l'écoulement.

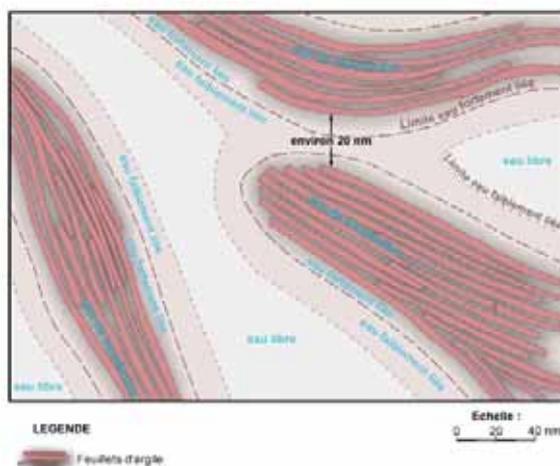


Schéma de la structuration de l'eau à l'échelle du pore dans les argilites

**Encadré 3.4 L'écoulement d'eau dans les milieux poreux naturels : la loi de Darcy**

Les causes d'un déplacement d'eau dans un milieu poreux sont les gradients de pression d'une part et les forces extérieures d'autre part. Dans les milieux poreux naturels les autres forces se réduisent généralement à la gravité. La combinaison de ces deux effets, gradient de pression et gravité, permet de définir la charge hydraulique. La loi de Darcy relie la charge hydraulique à la vitesse de l'eau :

$$\vec{U} = -K \vec{grad}H$$

Avec :

U : vitesse moyenne de l'eau à travers le milieu poreux ou vitesse de Darcy

K : coefficient de perméabilité (m.s<sup>-1</sup>)

$$H = \frac{p}{\rho g} + z \quad \text{: charge hydraulique (m de colonne d'eau)}$$

p : pression (Pa)

ρ : densité de l'eau (kg.m<sup>-3</sup>)

g : accélération de la pesanteur (m.s<sup>-2</sup>)

z : altitude (m)

Le gradient de charge hydraulique est le principal moteur du mouvement de l'eau dans les milieux poreux, mais il n'est pas le seul. Des constatations expérimentales font état de mouvements d'eau sous l'effet d'autres gradients, qui sont principalement :

- le gradient de potentiel électrique, gradE, responsable de l'effet d'électro-osmose,
- le gradient thermique, gradT, responsable de l'effet de thermo-osmose,
- le gradient de concentration chimique, gradC, responsable de l'effet d'osmose chimique.

La loi de Darcy se généralise donc en :

$$\vec{U} = -K_1 \vec{grad}H - K_2 \vec{grad}E - K_3 \vec{grad}T - K_4 \vec{grad}C$$

que l'on peut réécrire :

$$\vec{U} = -K_1 \left( \vec{grad}H + \sigma_E \vec{grad}E + \sigma_T \vec{grad}T + \sigma_C \vec{grad}C \right)$$

Avec  $\sigma_E$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma_C$  représentant respectivement des coefficients d'efficacités pour l'électro-osmotique, la thermo-osmotique et l'osmose chimique.

L'eau interstitielle de la couche est en surpression par rapport aux eaux des encaissants Dogger et Oxfordien calcaire. Les mesures à l'aplomb du site indiquent, sur toute l'épaisseur du Callovo-Oxfordien, une surpression de l'ordre de 20 à 40 mètres qui montre, près des limites de la couche, un gradient fort avec les encaissants (Figure 3.3.10). L'observation de surpressions interstitielles est fréquente dans les formations argileuses des bassins sédimentaires. Les origines possibles sont présentées dans l'Encadré 3.5 (Altmann & Coelho, 2005 ; Grauls, 1999).

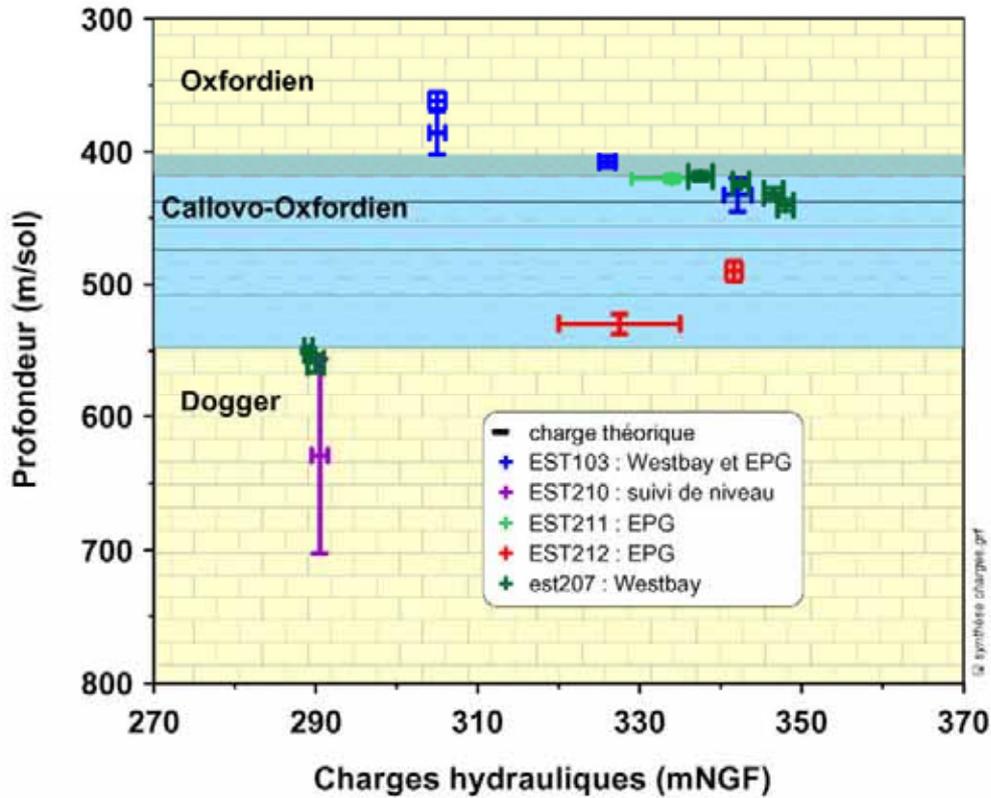


Figure 3.3.10 Profil des charges apparentes mesurées dans le Callovo-Oxfordien à l'aplomb du laboratoire souterrain de Meuse / Haute-Marne (compilation des mesures disponibles fin mars 2005)

**Encadré 3.5 Les phénomènes à l'origine de surpressions dans des formations argileuses profondes (1/2)**

Dans les bassins sédimentaires, les formations argileuses montrent fréquemment des pressions interstitielles plus fortes que la contrainte lithostatique, ou encore plus importantes que celles mesurées dans leurs encaissants. Les principaux moteurs de ces surpressions sont, soit une augmentation de volume de fluide (sous stress thermique par exemple), soit une diminution du volume des pores (sous stress mécanique notamment), soit encore des effets liés aux conditions aux limites ou aux modifications de celles-ci dans le temps. L'ensemble des causes principales sont résumées dans la figure ci-dessous.

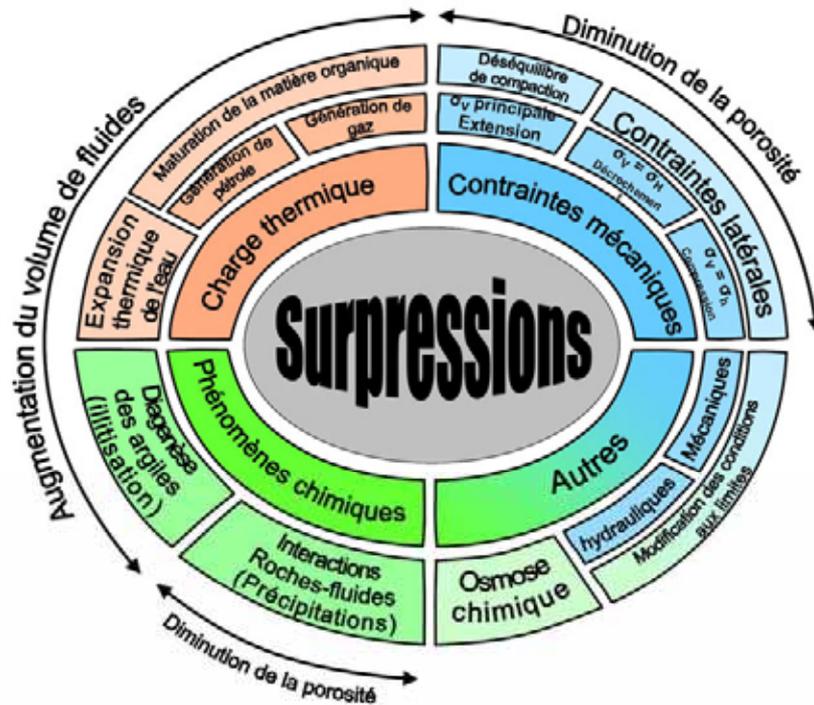


Figure d'après (Grauls, 1999), modifiée.  
Phénomènes à l'origine des surpressions dans les formations géologiques

- Les causes liées à la **contrainte mécanique** sont :
  - le déséquilibre de compaction (ou sous-compaction) qui s'observe lorsque les sédiments argileux, non encore consolidés, sont dans un stade précoce d'évolution diagenétique et montrent des teneurs en eau élevées. La surpression est dans ce cas le résultat de la reprise par l'eau interstitielle, d'une partie du poids de la pile sédimentaire sus-jacente.
  - la déformation progressive du squelette du sédiment sous l'effet des contraintes tectoniques qui ne permet pas la rééquilibration de la pression dans la formation par écoulement de l'eau hors de celle-ci, lorsqu'il existe de zones moins perméables au toit et au mur de la formation.
- Les causes liées à la **charge thermique** sont toutes à l'origine d'une augmentation du volume de fluide :
  - soit par production d'hydrocarbures liquides ou gazeux lors du craquage du kérogène,
  - soit par l'expansion thermique de l'eau.

***Les phénomènes à l'origine de surpressions dans des formations argileuses profondes (2/2)***

- Les causes liées au **stress chimique** sont essentiellement diagénétiques :
  - la transformation des smectites en illite (illitisation) libère l'eau qui était liée aux premières, contribuant donc à augmenter le volume de cette eau,
  - les interactions fluides solides et la néo-formation de phases minérales (carbonates par exemple) réduisant la porosité des argilites.
- Les **conditions aux limites des couches** (et leurs modifications dans le temps) peuvent également être à l'origine de surpressions.
  - Il s'agit de l'effet des modifications des conditions hydrauliques aux limites, dans les encaissements au toit et au mur de la couche : arrêt de la mise en charge des aquifères aux affleurements durant les cycles glaciaires, modifications de l'hydraulique de surface,...). Dans ce cas, le rééquilibrage dans la couche argileuse, de plus faible perméabilité, n'a pas eu le temps de les effacer.
  - Il peut également s'agir de l'existence dans le passé d'une charge mécanique plus élevée sur la couche. La diminution de charge peut être due, par exemple, à l'érosion partielle de la colonne sédimentaire, ou encore à la disparition d'une épaisseur de glace. Comme dans le cas précédent, la couche argileuse n'a pas eu le temps de se rééquilibrer aux nouvelles conditions.
- L'**osmose chimique**, enfin, est aussi une cause de ces surpressions, le moteur étant dans ce cas les différences d'activité chimique de l'eau entre deux milieux poreux (Encadré 3.6).

Des exemples dans de nombreux bassins montrent que les surpressions n'ont pas une cause unique mais que différentes contributions sont mises en jeu.

En l'état actuel des connaissances, il est possible d'écarter, pour le Callovo-Oxfordien, la plupart des causes potentiellement à l'origine des surpressions.

- Sur le plan mécanique, le Callovo-Oxfordien est une formation consolidée dont les caractéristiques sont acquises depuis plusieurs dizaines de Ma (cf. § 3.3.1.3), aussi, le phénomène de sous-compaction ne peut s'appliquer. D'un point de vue général, on peut écarter toute explication conduisant à une diminution de la porosité sous l'influence des contraintes naturelles. Les analyses quantitatives de ce phénomène (Altmann & Coelho, 2005) montrent que les valeurs des paramètres de la roche (perméabilités et vitesses de fluage) ne permettent pas d'expliquer la surpression mesurée.
- La faible charge thermique (tant présente que passée cf. § 3.3.1.3) sur la couche permet d'écarter les phénomènes d'expansion thermique de l'eau et la maturation de la matière organique.
- De même, le phénomène d'illitisation est exclu, les températures et les profondeurs de la couche atteintes durant son histoire étant trop faibles (cf. § 3.3.1.3). De plus, les autres phénomènes de diagenèse (concernant les précipitations de carbonates) sont, comme on l'a vu, limités et correspondent à des phénomènes anciens (datant d'une centaine de millions d'années, cf. § 3.3.1.3).
- L'évaluation quantitative des modifications hydrauliques aux limites, sous l'effet des cycles glaciaires, montre que celles-ci pourraient effectivement, sur le site, conduire à une surpression transitoire dans le Callovo-Oxfordien de l'ordre de quelques mètres (Gonçalvès *et al.*, 2004).

Celle-ci reste donc très inférieure aux valeurs mesurées et ne peut expliquer à elle seule le phénomène observé dans le Callovo-Oxfordien.

- L'existence d'une charge mécanique sur la couche dans le passé n'est pas non plus un phénomène à considérer dans la mesure où, d'une part, les glaciers ont toujours été absents à l'aplomb du site, et d'autre part, les cinétiques d'érosion sont lentes (quelques dizaines de mètres par Ma sur les plateaux) et progressives dans le temps (Brulhet, 2005b), bien inférieures à l'échelle des durées de rééquilibrage de pression dans la couche, de l'ordre de 10 000 ans (cf. § 6). Ces phénomènes ne sont donc pas susceptibles de créer de surpression par déséquilibre hydraulique.

Il en est de même pour l'artefact de mesure lié au fluage des argilites autour de la chambre, dont les évaluations montrent qu'il ne peut, dans la mesure où il existerait, expliquer toute l'amplitude de la surpression mesurée (Andra, 2005h, chapitre 19).

Seul, le phénomène d'osmose semble être en mesure d'expliquer l'amplitude des surpressions mesurées (Encadré 3.6). Un grand nombre d'études ont évoqué l'osmose et le comportement semi-perméable des milieux argileux pour expliquer les surpressions observées dans le milieu géologique (Goguel, 1987 ; Horseman *et al.*, 1996 ; Neuzil, 2000).

La figure ci-dessous (Figure 3.3.11) illustre une manière de représenter le Callovo-Oxfordien et ses encaissants dans le contexte d'un système osmotique. Dans ce cas, l'osmose est à l'origine de flux d'eau, par diffusion, des encaissants, Dogger et Oxfordien carbonaté, vers le Callovo-Oxfordien afin de compenser l'activité chimique de l'eau plus faible dans ce dernier. Ces flux deviennent nuls lorsque l'équilibre est atteint.

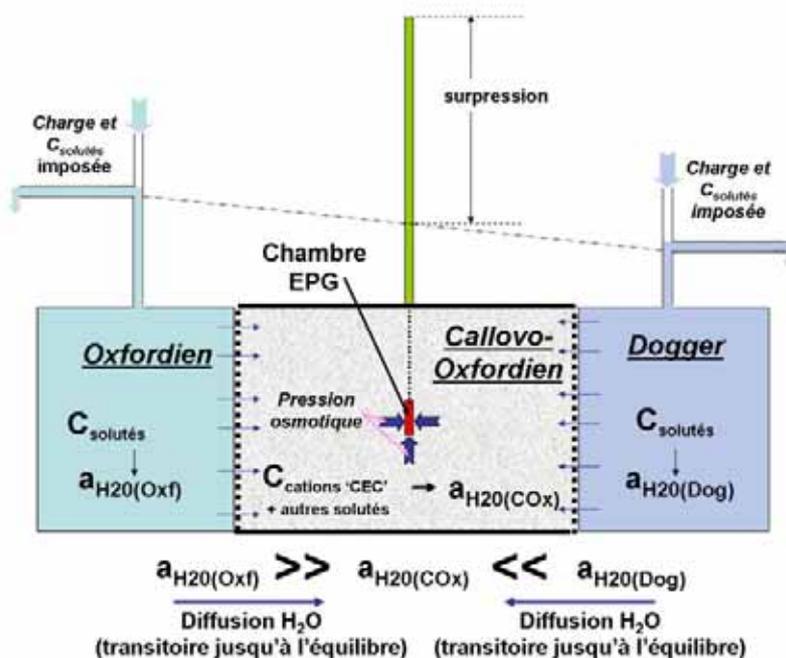
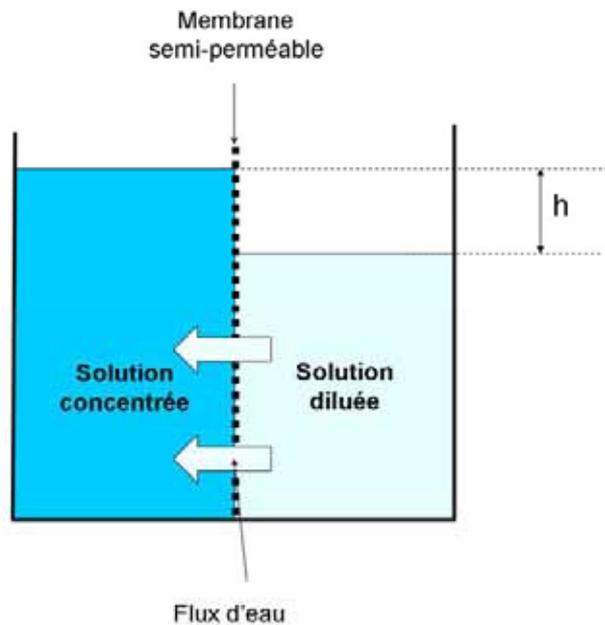


Figure 3.3.11 Représentation schématique du Callovo-Oxfordien et de ses encaissants dans le contexte d'un système osmotique

*Encadré 3.6 L'osmose chimique dans un milieu poreux*

L'osmose chimique est le déplacement d'eau lié à un gradient de concentration en éléments dissous (solutés) dans celle-ci. Elle s'observe classiquement lorsque que deux solutions de concentrations différentes sont mises en contact et que les solutés ne peuvent se répartir de manière homogène d'un milieu à l'autre par diffusion. Ce résultat peut être obtenu en interposant une membrane semi-perméable entre les solutions. Dans ce cas, le passage des solutés est empêché et celui du seul solvant (eau) est autorisé. Ce dernier diffuse alors de la solution la moins concentrée vers la solution la plus concentrée de manière à retrouver un équilibre. Lorsque celui-ci est atteint, une différence de charge hydraulique ( $h$ ) s'observe entre les deux solutions (voir schéma ci-dessous).



*Schéma de principe de l'osmose chimique*

Ainsi donc, l'osmose correspond au transfert par diffusion de molécules d'eau d'une région de plus forte activité chimique de l'eau vers une région à plus faible activité (l'activité de l'eau d'une solution correspond à sa fraction molaire, soit le rapport entre le nombre de molécules d'eau et le nombre total de molécules dans la solution).

Ce phénomène s'observe également dans le cas de deux milieux poreux en contact, pour lesquels la diffusion de solutés de l'un à l'autre est empêchée. Ceci peut être dû à deux causes différentes :

- l'un des milieux présente des tailles de pores plus petites que la taille des molécules (exclusion mécanique) ou,
- l'un des milieux montre des surfaces de pores chargées électriquement, ce qui exclut le transfert des ions de même signe (exclusion par répulsion électrostatique).

### L'osmose chimique dans un milieu poreux (2/2)

Si l'on considère des volumes poreux constants, la diffusion de l'eau vers le milieu le plus concentré augmente sa pression hydrostatique par rapport à l'autre milieu. Cette différence de pression induit un contre-flux darcien d'eau proportionnel au champ de charge. En l'absence d'échange de molécules de solutés, le système évolue vers un état stationnaire caractérisé par une différence de pression stable et un flux net d'eau (diffusion + darcien) nul. Si le système est fermé à l'échange de matière et d'énergie avec son environnement, cet état correspond à l'équilibre thermodynamique pour l'eau : la somme de son potentiel chimique (proportionnel à son activité) et son potentiel mécanique (proportionnel à la pression hydrostatique) est nul. La différence de pression entre les deux milieux est alors la pression osmotique.

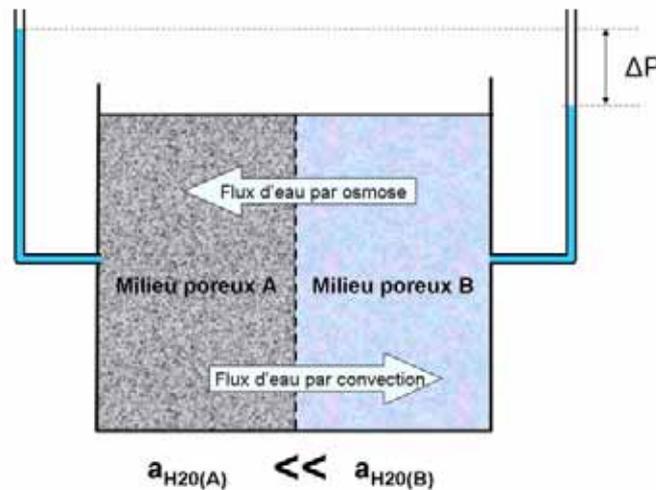


Schéma de principe de l'osmose chimique dans un milieu poreux

La théorie ( telle que décrite par exemple par (Horseman *et al.*, 1996) montre que cette pression osmotique, dans la mesure où les phénomènes empêchant le passage des solutés d'un réservoir à l'autre sont efficaces, s'exprime sous la forme :

$$\Delta P = - C_{ste} \ln \frac{a_A}{a_B}$$

$a_A$  et  $a_B$  étant respectivement les activités à l'équilibre de l'eau dans le réservoir concentré et dans le réservoir dilué.

Néanmoins, un certain nombre d'observations sur le site de Meuse / Haute-Marne semblent incompatibles avec l'utilisation d'un modèle pour l'osmose dans lequel on tient compte uniquement des teneurs en solutés dans l'eau de pore (eau libre) (Altmann & Coelho, 2005). Notamment, la surpression mesurée est importante entre la base de la couche et le Dogger (Figure 3.3.10) alors que les concentrations de solutés dans les solutions de pore sont très proches (cf. § 3.3.1.8). Dans ces conditions, un modèle fondé seulement sur la teneur en solutés dans l'eau de pore prévoit une surpression osmotique très faible. De plus, les coefficients de diffusion non nuls déterminés pour les espèces anioniques et cationiques dans les argilites (cf. § 3.3.1.7) montrent que cette formation n'empêche pas le transfert de solutés par diffusion pour les compositions chimiques des eaux du site (Altmann & Coelho, 2005).

Il existe cependant d'autres processus, et d'autres populations de solutés, pour maintenir des concentrations en solutés plus élevées dans le Callovo-Oxfordien que dans ses encaissants (Altmann & Coelho, 2005). En effet, les différentes études menées sur l'eau de pore du Callovo-Oxfordien montrent que la composition de cette solution (et donc au final, l'activité de l'eau dans les argilites) est contrôlée par (i) la compensation des excès (ou déficit) de charges des phases argileuses par des ions de charge opposée, (ii) les équilibres de solubilité imposés par le cortège minéral local et (iii) les teneurs en espèces non contrôlées par les interactions fluides-roche, en particulier les chlorures (Altmann & Jacquot, 2005).

La répartition des constituants majeurs du cortège minéral (carbonates, argiles,...), à l'origine des deux premiers phénomènes décrits ci-dessus, varie peu sur l'épaisseur de la formation. En revanche, certaines caractéristiques des minéraux argileux évoluent, en particulier la Capacité d'Echange Cationique (CEC, Encadré 10.4), et la teneur en chlorures (espèce majeure non contrôlée) qui décroît systématiquement et de façon linéaire entre le mur et le toit du Callovo-Oxfordien. Ce profil de teneur dans le Callovo-Oxfordien est contraint par les conditions aux limites du Dogger de l'Oxfordien (cf. § 3.3.1.8). Les échanges de chlorures entre le Dogger et l'Oxfordien sont considérés comme se faisant en régime permanent, d'où un profil stable dans le temps. Du fait de la nature même de ces différents processus, l'activité chimique de l'eau (sa fraction molaire) peut être considérée comme constante dans le temps en tout point du Callovo-Oxfordien. Dans ce cas, la relation présentée dans l'Encadré 3.6 peut alors s'appliquer.

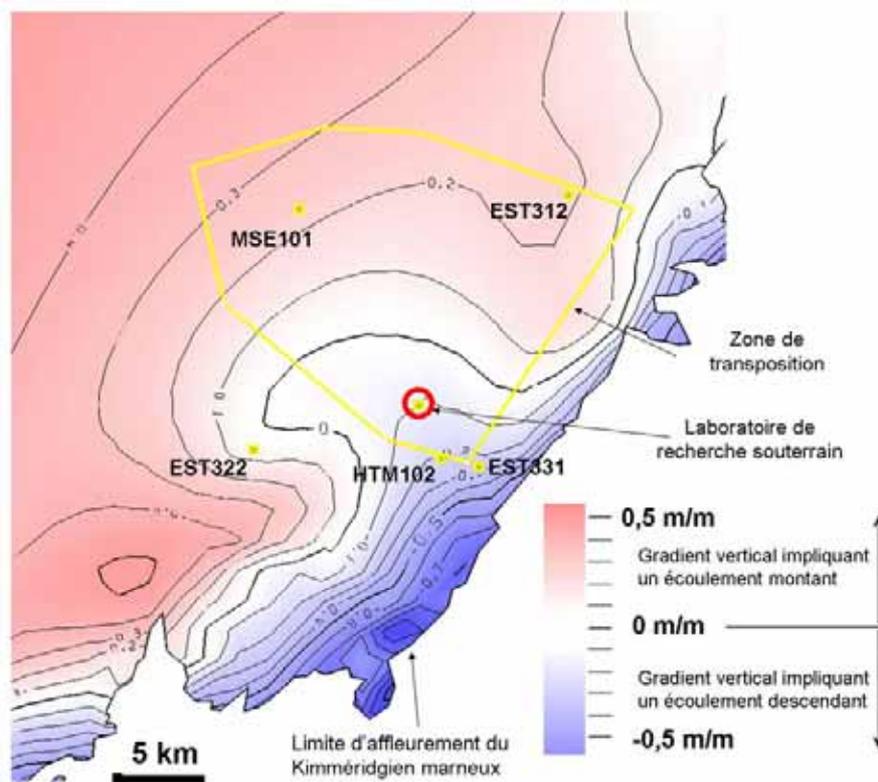
La valeur de l'activité chimique de l'eau au sein du Callovo-Oxfordien est fonction des concentrations dans l'eau de pore des argilites des espèces dissoutes d'une part et des ions compensateurs d'autre part. Les connaissances actuelles indiquent que la concentration totale en espèces dissoutes varie autour de 0,1 M dans le Callovo-Oxfordien. Cette concentration intègre les espèces contrôlées localement par les interactions entre fluides et minéraux et celles qui sont échangées, en régime permanent au travers du Callovo-Oxfordien (principalement les chlorures). Cette concentration est donc légèrement variable sur l'épaisseur de la couche. Dans le Dogger, la concentration totale en espèces dissoutes est du même ordre de grandeur qu'à la base du Callovo-Oxfordien. Elle est bien plus faible dans l'Oxfordien carbonaté (de l'ordre de 0,01 M). En ce qui concerne les ions compensateurs des charges permanentes des minéraux argileux, la concentration totale peut être estimée à partir de la capacité d'échange cationique. Les différentes évaluations menées (Altmann & Coelho, 2005) montrent qu'une fraction seulement de ces ions compensateurs (ceux qui ne sont pas directement accolés à la surface des argiles, soit de l'ordre de 5 à 15 % environ de l'ensemble de ces ions) a un effet sur l'activité de l'eau mobile et donc sur les pressions interstitielles résultant de phénomènes osmotiques. Cette estimation est cohérente avec les résultats d'études sur la structure et les effets de la double couche sur les processus de transport en milieux argileux hautement compactés (Revil & Leroy, 2004). La concentration totale en solutés de l'eau porale, si on y inclut cette fraction des ions compensateurs, devient alors très supérieure à celle de l'eau de pore mobile des argilites : si l'on considère que 15 % des ions compensateurs ont un effet sur l'activité de l'eau mobile, la concentration totale en solutés montre ainsi des valeurs variant entre 0,24 et 0,31 M. Cette variation s'explique par la variation en pourcentage de minéraux argileux, la nature des interstratifiés I/S R=0 et I/S R=1 qui montrent des valeurs de CEC différentes, et la concentration en chlorures dans l'eau de pore du Callovo-Oxfordien. L'activité de l'eau dans les argilites est alors plus faible que celles des deux encaissants (facteur 2 à 3 par rapport au Dogger et facteur 20 à 30 par rapport à l'Oxfordien carbonaté). Les profils de surpression osmotiques calculés sur cette base sont cohérents avec celui mesuré (qui montre une surpression présente sur toute l'épaisseur du Callovo-Oxfordien avec de forts gradients à proximité des limites) (Altmann & Coelho, 2005).

Les pressions osmotiques seraient à la fois dépendantes de la composition de l'eau mobile, mais aussi des phases porteuses de la CEC, ce qui explique les forts contrastes observés avec les formations encaissantes. Au sein même de la couche, la dissymétrie du profil de surpression peut être expliquée à la fois par les variations de CEC et par les variations de teneur en chlorures (Altmann & Coelho, 2005).

Cette surpression s'est mise en place très tôt dans l'histoire de la couche : dès que celle-ci a acquis ses caractéristiques telles qu'elles sont observées actuellement soit il y a environ 100 Ma (cf. § 3.3.1.3). Par la suite, le profil de cette surpression n'a évolué que faiblement, en liaison avec les modifications chimiques de l'eau dans les encaissants, jusqu'à environ -30 Ma (correspondant à la fin des processus diagenétiques dans les carbonates, cf. § 3.3.2.1 et 3.3.2.2). En l'absence de modifications majeures dans le système, il est resté très stable depuis cette date.

Si l'on considère que la surpression mesurée est stable dans le temps, le flux net d'eau correspondant au phénomène d'osmose est alors nul au sein du Callovo-Oxfordien et entre celui-ci et ses encaissants. En effet, le flux par diffusion dû au gradient d'activité chimique de l'eau est contrebalancé par le flux de Darcy induit par le gradient de charge hydraulique ainsi créé (Encadré 3.6). Ce phénomène d'osmose n'influencera donc pas l'écoulement au sein de la couche qui sera caractérisé par un régime permanent contrôlé uniquement par les champs de charges imposés par les encaissants. Cet écoulement peut donc être représenté par une loi de Darcy fondée uniquement sur les conditions aux limites hydrauliques dans les encaissants.

Ces dernières déterminent, au sein de la zone de transposition, un gradient de charge de  $0,2 \text{ m.m}^{-1}$  au sud impliquant un écoulement vertical descendant et un gradient de charge de  $0,3 \text{ m.m}^{-1}$  au nord et nord-ouest impliquant un écoulement vertical ascendant (Figure 3.3.12).



Au sein de la zone de transposition, les champs de charge dans les encaissants déterminent un gradient vertical responsable d'un écoulement essentiellement montant au travers du Callovo-Oxfordien (en moyenne de 0,1 à 0,2 m/m)

Figure 3.3.12 Évaluation du gradient de charge hydraulique verticale au travers du Callovo-Oxfordien, déduit des charges dans les encaissants

L'explication proposée pour l'origine de ces surpressions dans le Callovo-Oxfordien paraît donc en accord avec les données disponibles. Elle devra cependant être confortée et affinée au regard des données qui seront acquises dans le laboratoire souterrain. L'origine osmotique des surpressions mesurées implique une absence d'impact de ces dernières sur les écoulements dans le Callovo-Oxfordien. Ces surpressions mesurées restent de faibles amplitudes (20 à 40 m, soit 0,2 à 0,4 MPa). Dans le cas d'une participation minoritaire de phénomènes autres que l'osmose aux surpressions, l'ordre de grandeur du gradient vertical au travers de la couche n'est pas remis en cause. Dans le cas peu probable où l'origine des surpressions serait autre qu'un phénomène osmotique, l'impact de celles-ci resterait limité sur les écoulements dans le Callovo-Oxfordien. Elles conduiraient alors à envisager, au sein de la couche, des gradients hydrauliques qui seraient l'ordre du  $\text{m.m}^{-1}$  très localement, près des limites de la formation. Dans ces conditions, la diffusion reste dominante.

### 3.3.1.7 Le transport des solutés dans le Callovo-Oxfordien

Au sein d'un milieu poreux tel que le Callovo-Oxfordien dans son état initial, les phénomènes de transfert de solutés à considérer sont ceux qui se font sous l'effet des gradients présents naturellement dans la formation à une échelle macroscopique (Encadré 3.7) (Carnahan, 1985).

Pour le Callovo-Oxfordien dans son état naturel, certains phénomènes de transfert de solutés peuvent être négligés.

- Les gradients de potentiels électriques ne s'expriment qu'à l'échelle microscopique. Leur effet, qui permet une compréhension du comportement des ions de charges différentes, est implicitement pris en compte, à l'échelle macroscopique, dans les valeurs retenues des paramètres des phénomènes principaux (coefficient de diffusion et retard chimique notamment) (Altmann & Coelho, 2005).
- Les gradients thermiques ne sont pas, à l'état naturel (cf. § 3.2.3.1), suffisamment élevés pour permettre, au sein du Callovo-Oxfordien des transferts d'eau (thermo-osmose) ou de solutés (thermo-diffusion) (Coelho, 2005).

Les deux seuls « moteurs » possibles de transfert à l'actuel sont donc le gradient de pression hydrostatique (responsable de la convection chimique et de la dispersion cinématique) et le gradient d'activité chimique (à l'origine du phénomène de diffusion, mais contrôlant également partiellement la dispersion cinématique) (Encadré 3.8).

*Encadré 3.7 Les phénomènes de transfert de solutés dans les milieux poreux (Carnahan, 1985)*

Dans le cadre de la théorie des processus irréversibles, théorie d'Onsager, un ensemble de phénomènes de transferts est possible en fonction de différents gradients et de l'entité transportée, comme indiqué dans le tableau suivant :

		Gradient			
		Potentiel électrique	Charge hydraulique	Concentration	Température
Entité transportée	Charge électrique ( $C.m^{-2}.s^{-1}$ )	<b>Conduction électrique</b> (Loi d'Ohm)	<b>Convection électrique</b> (Effet Rouss)	<b>Courant d'exclusion</b> (Potentiel de membrane)	<b>Thermo-électrique</b> (effet Seeback / effet Thompson)
	Solvant (eau) ( $m^3.m^{-2}.s^{-1}$ )	<b>Electro-Osmose</b>	<b>Conduction hydraulique</b> (Advection) (loi de Darcy)	<b>Osmose chimique</b>	<b>Thermo-Osmose</b>
	Solutés ( $mols.m^{-2}.s^{-1}$ )	<b>Electro-diffusion</b> (Electrophorèse)	<b>Convection chimique</b> (Osmose inverse)	<b>Diffusion chimique</b> (Loi de Fick)	<b>Thermo-diffusion</b> (Effet Soret)
	Chaleur ( $J.m^{-2}.s^{-1}$ )	<b>Effet Peltier</b>	<b>Thermofiltration</b>	<b>Effet Dufour</b>	<b>Conduction thermique</b> (Loi de Fourier)

Dans ce tableau, les phénomènes de transport (dits « diagonaux ») reliant le flux d'une entité donnée au gradient de même nature sont reportés en rouge et sont qualifiés de loi (loi de Darcy, loi de Fick, ...). Les autres phénomènes sont dits « non-diagonaux » et sont généralement qualifiés d'effet (effet Soret, effet Dufour, ...).

Concernant les solutés, les principaux phénomènes de transfert sont donc :

- la convection chimique correspondant au transfert des solutés par l'écoulement de l'eau (sous gradient de pression hydrostatique),
- l'électrodifusion, sous gradient de potentiel électrique,
- la thermodiffusion, sous gradient de température,
- la diffusion, sous gradient de concentration, régie par la loi de Fick.

**Encadré 3.8 L'équation de transport des solutés dans les milieux poreux (1/2)**

Les phénomènes de transport généralement retenus pour décrire les flux de soluté dans les milieux poreux perméables sont la convection, la dispersion hydraulique et la diffusion moléculaire.

La convection correspond à l'entraînement du soluté par le flux d'eau. Elle dépend de la vitesse de Darcy, de la concentration en soluté et de la porosité cinématique (porosité accessible au soluté pour la convection).

La dispersion hydraulique est liée aux hétérogénéités du champ de vitesse dans un écoulement convectif. Cette grandeur dépend du gradient de concentration et de la vitesse moyenne du fluide (vitesse de Darcy). Dans la majeure partie des situations rencontrées en hydrogéologie elle dépend également d'une variable, appelée dispersivité, représentative de la taille des plus grosses hétérogénéités rencontrées sur le parcours des solutés. La détermination de cette variable est empirique.

La diffusion moléculaire résulte du mouvement brownien des molécules de soluté qui tend à réduire les différences de concentration existant en différents points d'un milieu considéré comme continu. Outre le gradient de concentration, la diffusion dépend d'une variable appelée coefficient de diffusion effectif. Le flux diffusif se fait au travers d'une porosité dite porosité accessible à la diffusion. Pour un milieu donné, et notamment pour le Callovo-Oxfordien où les interactions fluides/solides sont importantes, le coefficient de diffusion effectif et la porosité accessible sont des paramètres spécifiques à chaque soluté.

Le terme de dispersion (au sens large) intègre le terme de dispersion hydraulique et le terme de diffusion.

L'équation de transfert d'un soluté en milieux poreux s'écrit :

$$\frac{\partial \omega C}{\partial t} = -\text{div}(F_c + F_{dh} + F_d) + m \quad (1)$$

avec :

$\omega$  : porosité accessible au soluté (-)

$C$  : concentration ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

$F_c$  : flux convectif ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )

$F_{dh}$  : flux de dispersion hydraulique ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )

$F_d$  : flux diffusif ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )

$m$  : source de soluté ( $\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$ )

En général on utilise, dans les milieux poreux, les expressions suivantes pour  $F_c$ ,  $F_{dh}$  et  $F_d$  :

$$F_c = qC \text{ avec } q \text{ vitesse de Darcy (flux d'eau, en } \text{m.s}^{-1}\text{)} \quad (2a)$$

$$F_{dh} = \alpha q \text{grad}C \text{ avec } \alpha \text{ dispersivité (m)} \quad (2b)$$

$$F_d = D_e \text{grad}C \text{ avec } D_e \text{ coefficient de diffusion effectif (en } \text{m}^2.\text{s}^{-1}\text{)} \quad (2c)$$

En intégrant les expressions (2a) à (2c) dans l'équation (1) on obtient :

$$\frac{\partial \omega C}{\partial t} = \text{div}((\alpha q + D_e) \text{grad}C - qC) + m \quad (3)$$

***L'équation du transport de soluté dans les milieux poreux (2/2)***

Pour déterminer lequel des deux modes de transfert, convection ou dispersion (correspondant à la fois à la dispersion hydraulique et à la diffusion), est dominant à l'échelle macroscopique sur une distance L, on peut calculer un nombre adimensionnel, dit nombre de Péclet à grande échelle, Pe :

$$Pe = \frac{qL}{\alpha q + D_e} \quad (4) \text{ avec } L, \text{ distance de transfert (m)}$$

Dans un milieu monodimensionnel, ce nombre représente le rapport entre le temps de parcours par dispersion et le temps de parcours par convection. Lorsqu'il est largement supérieur à 1, le temps de parcours par convection est plus petit que le temps de parcours par dispersion. À l'inverse, lorsqu'il est largement inférieur à 1, le temps de parcours par dispersion est plus faible que le temps de parcours par convection.

D'un point de vue dimensionnel, il représente également le rapport entre les deux termes  $(\alpha q + D_e) \text{grad}C$  et  $qC$  présents dans le membre de droite de l'équation (3). Lorsque le nombre de Péclet à grande échelle est largement supérieur à 1, cela signifie que le terme  $(\alpha q + D_e) \text{grad}C$  peut être négligé devant le terme  $qC$ , et donc que la convection est dominante sur la dispersion en terme de flux de soluté. Lorsqu'il est largement inférieur à 1, c'est le terme convectif qui peut être négligé devant le terme de dispersion en terme de flux de soluté.

Donc, lorsque le nombre de Péclet à grande échelle est largement supérieur à 1, la convection est à la fois le mode de transport le plus rapide et le mode de transport dominant en terme de flux. À l'inverse, lorsque le nombre de Péclet à grande échelle est largement inférieur à 1, c'est la dispersion qui domine, aussi bien en terme de vitesse de transfert que de flux de soluté.

- Lorsque le nombre de Péclet à grande échelle est largement supérieur à 1, c'est la convection qui domine. L'équation (3) peut alors se réduire à :

$$\frac{\partial \omega C}{\partial t} = -\text{div}(qC) + m \quad (5)$$

- Lorsque le nombre de Péclet à grande échelle est largement inférieur à 1, le transport est dominé par la dispersion et l'équation (3) peut alors se réduire à :

$$\frac{\partial \omega C}{\partial t} = \text{div}((\alpha q + D_e) \text{grad}C) + m \quad (6)$$

Si la diffusion est dominante sur la dispersion hydraulique, alors  $\alpha q$  est très inférieur à  $D_e$ .

En une dimension, l'équation (6) s'exprime sous forme d'une équation de type parabolique :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (7)$$

$D_p$  étant le coefficient de diffusion de pore :

$$D_p = \frac{D_e}{\omega} \quad (8)$$

C'est à partir de l'équation (7) qu'il est possible d'estimer les temps caractéristiques de diffusion (Encadré 4.1).

Les propriétés texturales et porales du Callovo-Oxfordien conditionnent les paramètres de transport. La porosité des argilites est essentiellement de la porosité interne à la matrice argileuse, constituée de pores de petites tailles (cf. § 3.3.1.5), déterminant des chemins de transfert tortueux et donc, des coefficients de diffusion, fortement diminués pour toutes les espèces, de quelques  $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  pour les anions à quelques  $10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  pour les cations (voir valeurs dans le Tableau 3.3.1) (Altmann & Coelho, 2005). La vitesse de transport est donc largement influencée par l'espèce chimique et notamment la charge de l'ion en solution (Encadré 3.9).

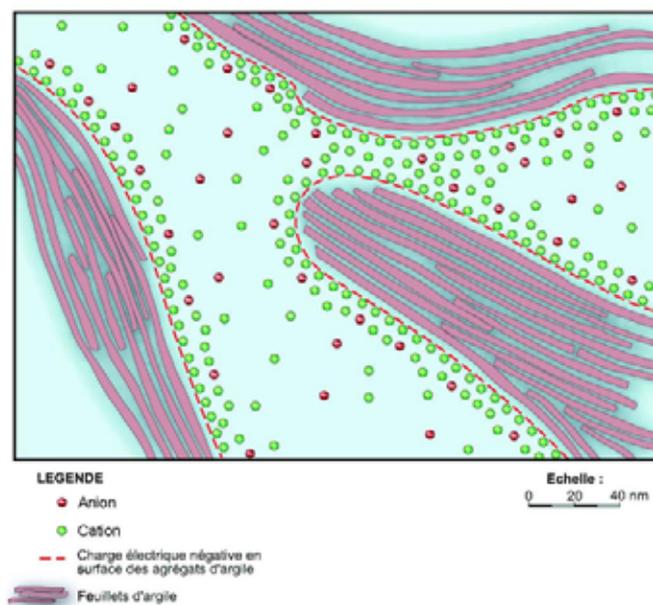
### Encadré 3.9 *L'exclusion anionique dans les argilites du Callovo-Oxfordien*

Les feuillets d'argiles présents dans les argilites du Callovo-Oxfordien possèdent des propriétés électrochimiques spécifiques et notamment des charges électriques négatives en surnombre à leur surface. Les anions, par exemple  $\text{I}^-$ , ont donc tendance à être repoussés vers le centre des pores.

De plus, la structure de la porosité des argilites du Callovo-Oxfordien comporte une proportion importante de très petits pores (de quelques dizaines de nanomètres au nanomètre) (Altmann & Coelho, 2005). Or, du fait de la répulsion électrique que les feuillets d'argiles exercent sur les anions, ceux-ci ne peuvent pas accéder à des pores de tailles inférieures à une vingtaine de nanomètres (Altmann & Coelho, 2005). Un nombre important de pores présents dans les argilites du Callovo-Oxfordien est donc accessible à l'eau et aux cations, mais pas aux anions (cf. Figure suivante). Ce phénomène est appelé exclusion anionique.

À l'échelle macroscopique, le principal effet de ce phénomène est une diminution des propriétés de diffusion des anions (coefficient de diffusion et porosité accessible à la diffusion) par rapport à celles des cations et celles de l'eau elle-même.

Il est possible que ce phénomène influe également sur la convection des anions, car ils ne sont pas présents dans la totalité du flux d'eau. Ces effets n'ont pas été étudiés jusqu'à présent dans les argilites du Callovo-Oxfordien, le transport des solutés y étant largement dominé par la diffusion.



*Schéma de principe de l'exclusion anionique*

D'une manière générale, les cations sont attirés par les feuillets d'argiles chargés négativement. Ils se trouvent donc en moyenne plus proches de la surface de ces feuillets que les anions, ce qui favorise les interactions chimiques. La plupart des cations se sorbent donc, plus ou moins bien, sur les surfaces des feuillets d'argile, ce qui ralentit leur parcours par rapport aux anions. Les cations qui présentent de

fortes affinités avec les feuillets argileux ne parcourent ainsi qu'à peine quelques mètres par million d'années.

Cependant, tous les cations n'ont pas d'affinité particulière avec les sites chimiques à la surface des feuillets d'argile (cf. § 10.4) et ne sont donc pas sorbés. Pour un cation non sorbé, le coefficient de diffusion effectif est de l'ordre de  $2,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  alors que la porosité accessible à la diffusion est de 18 % (Altmann & Coelho, 2005). Ce cation, non sorbé, parcourt par diffusion dans les argilites du Callovo-Oxfordien, en moyenne, un mètre en une dizaine d'années, une dizaine de mètres en un millier d'années et met une durée supérieure à la centaine de milliers d'années pour traverser l'épaisseur totale de la couche soit 130 m (le temps caractéristique de diffusion étant proportionnel au carré de la distance parcourue, Encadré 4.1 et Encadré 3.8).

Les anions sont soumis à l'exclusion anionique (Encadré 3.9). Ce phénomène repousse les anions vers le centre des pores. Ceci explique que, par rapport aux cations, leur coefficient de diffusion et leur porosité accessible sont plus faibles (respectivement de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et 5 % (Altmann & Coelho, 2005)). Comme les anions sont repoussés des surfaces solides, leur rétention est en général moindre que celle des cations. L'évaluation théorique des temps caractéristiques de transfert (voir le calcul présenté dans l'Encadré 4.1) montre qu'un anion non sorbé parcourt en moyenne dans les argilites du Callovo-Oxfordien, un mètre en une centaine d'années, une dizaine de mètres en plus d'un millier d'années et met plusieurs millions d'années pour traverser toute l'épaisseur du Callovo-Oxfordien.

Ce phénomène est sensible également à la composition chimique de l'eau de pore, notamment à sa force ionique, cette dernière contrôlant l'extension de la zone d'influence des surfaces minérales sur la distribution des ions en solutions (cf. § 3.3.1.6 et (Altmann & Coelho, 2005)). Les coefficients de diffusion effectifs et les porosités accessibles à la diffusion montrent des valeurs très peu variables sur l'ensemble de la couche (Figure 3.3.13, présentant les coefficients de diffusion de l'eau tritiée, espèce chimique neutre). Cette constance est le reflet de l'homogénéité lithologique et texturale du Callovo-Oxfordien (Altmann & Coelho, 2005).

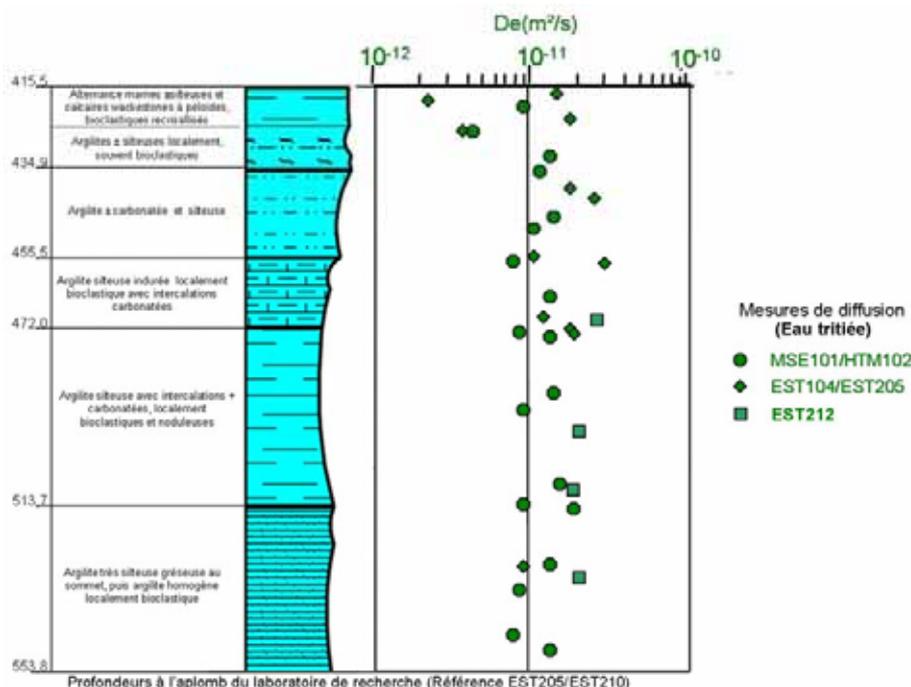


Figure 3.3.13 Profil vertical sur l'ensemble du Callovo-Oxfordien des valeurs mesurées du coefficient de diffusion de l'eau tritiée (HTO)

Concernant la convection chimique, celle-ci correspond au transport du soluté par le flux d'eau. Ce phénomène dépend donc directement des caractéristiques hydrodynamiques de la formation : perméabilité et gradient de charge hydraulique (cf. § 3.3.1.6). La porosité cinématique correspond à la porosité accessible à ce phénomène et permet de calculer la vitesse moyenne de transfert au travers du milieu poreux. En faisant abstraction de la dispersion hydraulique, liée aux hétérogénéités du champ de vitesse (Encadré 3.8), le temps caractéristique de transport par convection chimique est celui de l'écoulement, soit un million d'années pour parcourir quelques mètres et plusieurs dizaines de millions d'années pour traverser la couche du Callovo-Oxfordien (cf. § 3.3.1.6). Ces temps caractéristiques sont nettement plus longs, de un à deux ordres de grandeur, que ceux du transport par diffusion des anions et des cations présentés ci-dessus.

Dans la couche, le calcul du nombre de Péclet à grande échelle (Encadré 3.8) est très faible, de l'ordre de 0,02 pour les anions (Altmann & Coelho, 2005), et confirme une diffusion dominante. Les interprétations des profils de salinités dans le Callovo-Oxfordien (cf. § 3.3.1.8), illustrant bien le caractère confinant de la couche, et des profils de traceurs naturels dans les eaux de pore (notamment les isotopes du chlore, Encadré 3.1) (Altmann & Coelho, 2005) corroborent cette prédominance de la diffusion dans le Callovo-Oxfordien. Les temps de transfert théoriques (voir calcul présenté dans l'Encadré 4.1) au travers de la couche sont donc longs : de l'ordre de plusieurs centaines de milliers à plusieurs millions d'années pour les espèces anioniques non retardées correspondant aux espèces les plus mobiles. Ce constat est cohérent avec les résultats préliminaires des études des gaz rares présents dans l'eau de pore (notamment He, Encadré 3.1) (Andra, 2004a).

Les évaluations menées à partir des différents scénarios possibles à l'origine des surpressions (cf. § 3.3.1.6) montrent que, même en prenant en compte une surpression affectant effectivement le gradient de charge hydraulique au sein du Callovo-Oxfordien (et donc d'origine autre qu'osmotique), cette prédominance de la diffusion par rapport à la convection reste valable (Altmann & Coelho, 2005). Les estimations du nombre de Péclet menés dans ces cas, sur des bases maximalistes et sortant des domaines phénoménologiquement vraisemblables, montrent que ce dernier reste au plus compris entre 0,3 et 0,9.

### 3.3.1.8 La composition chimique de l'eau interstitielle dans le Callovo-Oxfordien

Les faibles vitesses de circulation d'eau et de transfert des solutés permettent des interactions fortes entre l'eau interstitielle et les minéraux, ces derniers contrôlant au final la composition de l'eau dans la formation. Ainsi, les concentrations des espèces dissoutes sont considérées à l'équilibre thermodynamique pour le Callovo-Oxfordien dans son état initial, cet équilibre étant contrôlé par certaines phases minérales des argilites elles-mêmes.

La faible teneur en eau de la formation, 7 à 8 % en pondéral (Altmann & Jacquot, 2005), ainsi que sa faible perméabilité, ne permettent pas d'analyser directement la composition des eaux porales. Celle-ci a été déterminée à partir d'analyses sur échantillons du Callovo-Oxfordien et de modélisations géochimiques. Cette composition est considérée homogène sur toute l'épaisseur de la formation, en cohérence avec l'homogénéité lithologique globale de celle-ci (Altmann & Coelho, 2005 ; Altmann & Jacquot, 2005). Les compositions des eaux ainsi évaluées montrent un pH neutre (légèrement supérieur à 7). Elles sont réductrices, comme le montre la présence de pyrite et de matière organique. Chimiquement, les eaux présentent un caractère calco-sodique carbonaté. Les analyses des isotopes stables de l'eau (Andra, 2004a), confirmées par celles réalisées sur les gaz (H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>) dissous, (Encadré 3.1), (Girard *et al.*, 2002) montrent que celle-ci a clairement une origine météorique. Cette eau a donc remplacé, par diffusion à partir des encaissants, l'eau marine originelle. Ce processus s'est déroulé sur une durée de l'ordre de quelques centaines à quelques millions d'années à partir du moment où de l'eau météorique a pu circuler dans les encaissants, soit il y a au moins 65 millions d'années, durant le Crétacé (cf. § 3.2.1.1). (Andra, 2005h, chapitre 18). Les données sur les isotopes stables du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ , Encadré 3.1) dans les bicarbonates dissous (Girard *et al.*, 2003) démontrent l'équilibre chimique et isotopique des eaux interstitielles avec les phases carbonatées. Cet équilibre

chimique confirme les vitesses de transfert lentes déjà mises en évidence dans ce milieu (cf. § 3.3.1.7). Les mesures de pression partielle de CO<sub>2</sub> sont en moyenne, pour toute la formation, comprises entre 7,2 et 3,1 mbar (0,72 et 3,1 MPa), correspondant respectivement à des Log de pressions partielles de CO<sub>2</sub> de -2,15 et -2,51. Les eaux sont également sulfatées et chlorurées (la chlorinité étant déterminée analytiquement). Les autres éléments (cations majeurs et silicium) sont contrôlés par les différentes phases minérales (Altmann & Jacquot, 2005) (Tableau 3.3.1).

Les concentrations de certaines espèces mobiles (chlore notamment) varient sur l'épaisseur de la couche (entre 1 000 et 500 mg.L<sup>-1</sup>, de bas en haut pour le Cl<sup>-</sup> (Lavastre, 2002), à l'aplomb du site), traduisant un échange de ces espèces entre le Callovo-Oxfordien et les formations encaissantes. À l'échelle du secteur, ces profils montrent (Figure 3.3.14) :

- un contrôle du profil de salinité dans le Callovo-Oxfordien par la salinité du Dogger (sensiblement plus forte au Nord-Est –forages EST311/312- qu'au Sud-Ouest –forages EST321/322),
- des salinités basses de l'Oxfordien carbonaté, contrastant avec celle du Callovo-Oxfordien et du Dogger. Ces salinités basses sont contrôlées par les flux convectifs des eaux circulants dans cet encaissant qui diluent les flux montants par diffusion au travers du Callovo-Oxfordien (Andra, 2004c).

Ces constats confortent l'image d'échanges très limités au travers de la couche, concernant des échelles de temps longues, de l'ordre de la dizaine de Ma, à diffusion dominante. Ces échanges sont considérés comme se faisant en régime quasi-permanent (Altmann & Coelho, 2005).

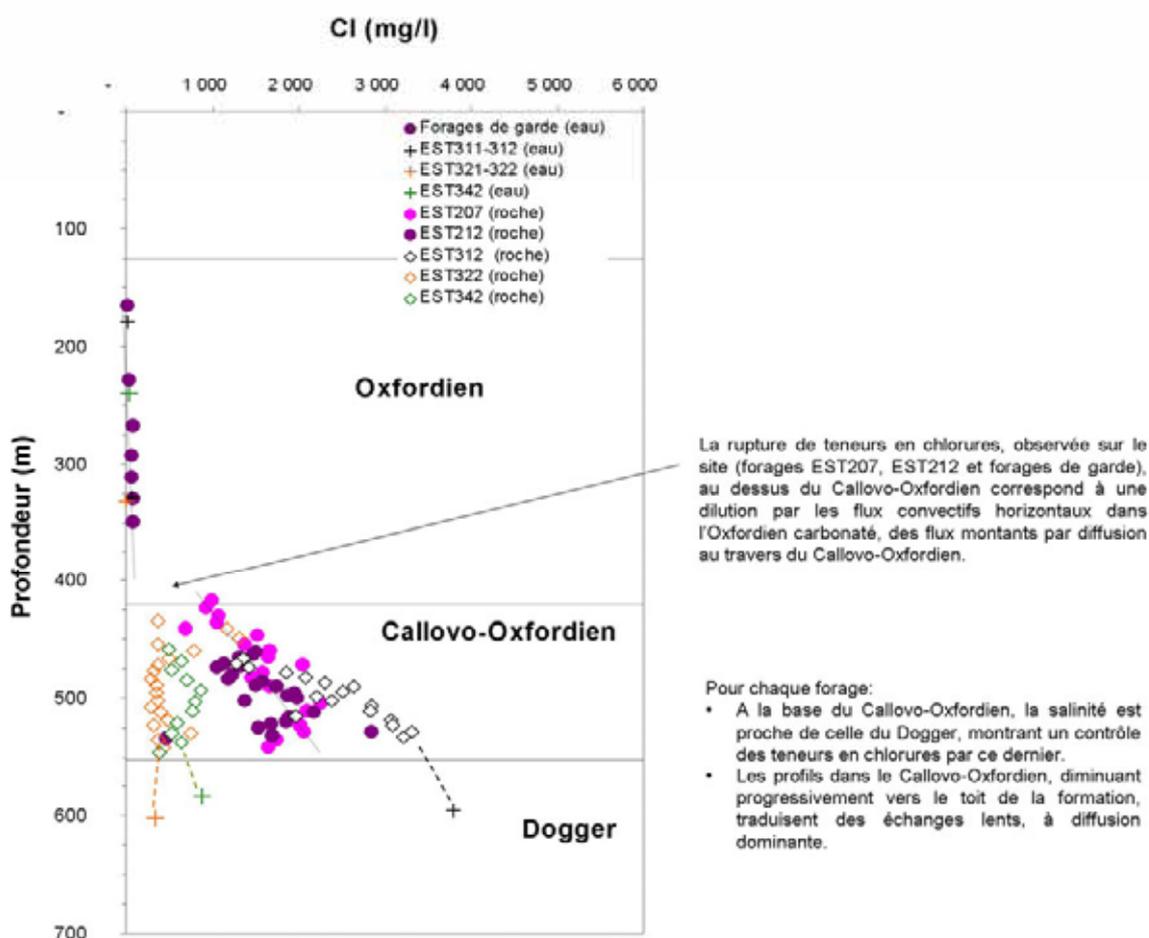


Figure 3.3.14 Profils verticaux des teneurs en chlorures dans le Callovo-Oxfordien et ses encaissants à l'échelle du secteur

### **3.3.1.9 Synthèse des principales caractéristiques du Callovo-Oxfordien**

La formation géologique du Callovo-Oxfordien apparaît donc comme une couche ayant eu des conditions de dépôts calmes et une évolution dans un environnement stable depuis des dizaines de millions d'années. Cette couche montre une géométrie simple et régulière sur la zone d'étude et une épaisseur supérieure à 130 m sur la zone de transposition. Sur cette surface, elle montre une grande homogénéité de ses propriétés, thermiques, mécaniques, hydrauliques et chimiques. L'ensemble des résultats obtenus indique un milieu avec un fort caractère confinant, la couche jouant un rôle de barrière.

Le Callovo-Oxfordien est bien isolé de l'environnement de surface. Hormis de possibles phénomènes transitoires (impact des derniers changements climatiques cf. § 3.2.3.2) affectant les conditions aux limites de la couche et n'ayant qu'un impact limité sur cette dernière en grand, la formation est à l'équilibre dans son état actuel étant donné la localisation du site au sein d'une zone stable du bassin, la profondeur de la couche et ses propriétés minéralogiques et texturales acquises très tôt dans l'histoire géologique.

Le tableau ci-après synthétise les principales caractéristiques du Callovo-Oxfordien dans son état initial.

Tableau 3.3.1 Principales caractéristiques du Callovo-Oxfordien dans son état initial.

Caractéristiques		Valeurs
<b>Géométrie (zone de transposition)</b>	<b>Epaisseur</b>	130 à 160 m
	<b>Pendage</b>	1 à 1,5° vers le NO
	<b>Profondeur (centre de la couche)</b>	500 à 630 m
<b>Composition minéralogique (en masse)</b>	<b>Argiles</b>	25 à 60 %
	<b>Carbonates</b>	15 à 50 %
	<b>Quartz</b>	25 à 35 %
	<b>Matière organique</b>	0,5 à 2 %
	<b>Pyrite</b>	2 à 3 % (maximum)
<b>Conductivité thermique</b>		1,3 à 1,9 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> en vertical 1,9 à 2,7 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> en horizontal
<b>Etat de contrainte</b>		Orientation: $\sigma_H$ : N155°E $\sigma_H / \sigma_h = 1$ à 1,2 $\sigma_h = \sigma_v =$ poids des terrains
<b>Propriétés mécaniques (zone B/C)</b>	<b>Module de déformation</b>	4 500 MPa
	<b>Résistance à la compression</b>	21 MPa
	<b>Vitesse de fluage</b>	Jusqu'à quelques mois : 10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>-3</sup> an <sup>-1</sup> Au-delà de la première année : 10 <sup>-4</sup> an <sup>-1</sup>
<b>Perméabilité</b>		De quelques 10 <sup>-14</sup> à quelques 10 <sup>-13</sup> m.s <sup>-1</sup> L'anisotropie de perméabilité horizontale/verticale se situe au sein de cette gamme de valeurs (facteur 10 maxi)
<b>Porosité totale</b>		18 %
<b>Coefficient de diffusion</b>	<b>Anions</b>	10 <sup>-12</sup> à 10 <sup>-11</sup> m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
	<b>Cations</b>	2,5·10 <sup>-11</sup> à 5·10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
<b>Porosité accessible</b>	<b>Anions</b>	5 %
	<b>Cations</b>	18 %
<b>Chimie des eaux interstitielles (valeurs maximales et minimales d'après Altmann &amp; Jacquot, 2005)</b>	<b>pH</b>	6,9 à 7,6
	<b>Eh</b>	-180 à -150 mV
	<b>Force ionique</b>	0,09 à 0,12 M
	<b>Cl<sup>-</sup></b>	1,2 à 3·10 <sup>-2</sup> mol.L <sup>-1</sup>
	<b>SO<sup>4-</sup></b>	3,4·10 <sup>-2</sup> à 3,4·10 <sup>-3</sup> mol.L <sup>-1</sup>
	<b>Ca<sup>+</sup></b>	1 à 1,5·10 <sup>-2</sup> mol.L <sup>-1</sup>
	<b>Na<sup>+</sup></b>	2,5 à 4,4·10 <sup>-2</sup> mol.L <sup>-1</sup>
	<b>Carbonates (HCO<sub>3</sub>)</b>	7,5·10 <sup>-4</sup> à 3,4·10 <sup>-3</sup> mol.L <sup>-1</sup>
<b>Log P<sub>C02</sub></b>		-2,96 à -1,63

### 3.3.2 Les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien

Les deux encaissants carbonatés immédiatement sous- et sus-jacents au Callovo-Oxfordien, le Dogger et l'Oxfordien carbonaté, sont des ensembles calcaires, aquifères, qui imposent les conditions aux limites, notamment hydrauliques et chimiques, de la couche du Callovo-Oxfordien (Figure 3.2.4).

#### 3.3.2.1 Le Dogger

Le Dogger, reposant sur les argiles du Lias, est une formation de 300 mètres d'épaisseur. Il correspond, à l'échelle du Bassin de Paris, au développement de grandes plates-formes carbonatées, sous une très faible tranche d'eau, dans un environnement de type tropical. Ces conditions sont responsables de la grande variété de faciès observés (débris coquilliers, sables calcaires, récifs,...) qui se déposent au gré des courants et des évolutions de la profondeur d'eau. Ces rapides variations se retrouvent tant latéralement que verticalement (Guillocheau *et al.*, 2002 ; Trouiller & Benabderrahmane, 2005). Un intervalle plus argileux, présent partout dans l'Est de la France (« Marnes de Longwy ») et séparant les deux ensembles calcaires du Bajocien et du Bathonien, marque un approfondissement relatif des conditions de dépôt. Au toit de la formation, la Dalle nacrée, très riche en débris coquilliers, marque le passage entre le Dogger et le Callovo-Oxfordien (Figure 3.2.4).

Juste après son dépôt, le Dogger a été soumis à un ensemble de processus diagenétiques qui ont contrôlé des phases successives de dissolutions et de recristallisations de carbonates. Ces processus, classiques pour les formations carbonatées, s'inscrivent dans une évolution continue (Choquette & Pray, 1972) :

- les premières phases sont précoces et se déroulent pendant et juste après le dépôt du sédiment,
- les phases suivantes sont liées à l'enfouissement de la série,
- enfin les dernières phases concernent la dénudation des séries sédimentaires et leur retour à l'affleurement.

Ces processus sont très différents de ceux qui ont affecté le Callovo-Oxfordien : pour ce dernier, les phénomènes de diagenèse sont précoces et n'impliquent que des volumes restreints de roches, étant donné les faibles perméabilités de cette dernière. Pour les carbonates, qui à l'origine présentent des fortes porosités et perméabilités, les processus de diagenèse mettent en œuvre des volumes plus importants de fluides et sont très dépendants des paléo-circulations au sein des formations.

À l'échelle du bassin, les approches de modélisation hydrogéologique permettent, pour le Dogger, de proposer un événement diagenétique majeur daté du début du Tertiaire (de -65 à -50 Ma) (Gonçalvès, 2002). Cette datation est en accord avec les évaluations géochimiques menées sur le site, montrant que les dernières cimentations, s'exprimant sous forme d'un ciment de blocage de la porosité dans l'ensemble des faciès granulaires, sont liées à un apport d'eau météorique (résultats de  $\delta^{18}\text{O}$  notamment) (Buschaert *et al.*, 2004 ; Vincent, 2001). Ainsi, les manifestations les plus tardives de la diagenèse dans les carbonates sont à relier à la mise à l'affleurement des formations après le Crétacé, permettant l'infiltration des eaux météoriques aux affleurements. Cette infiltration a pu être également facilitée localement par le jeu des failles, notamment durant l'Oligocène qui est une période en distension. Pendant ces phases distensives, ces accidents peuvent également jouer un rôle de court-circuit entre les formations profondes et permettre, à proximité des accidents, des mélanges de fluides de formations aquifères différentes. Cette influence des accidents lors de ces processus, mise en évidence dans le centre du Bassin de Paris (Worden *et al.*, 1999 ; Worden & Matray, 1995), est suggérée, sur le secteur, par la signature isotopique du remplissage des fractures. Cette dernière montre, aux abords des zones faillées (Fossé de Gondrecourt et à proximité de la faille de Poissons), une contribution possible de fluides triasiques (Buschaert, 2001 ; Maes, 2002). Néanmoins, cette contribution des failles est limitée dans le temps et dans l'espace. Notamment, ce schéma ne se conçoit

que durant les périodes d'extension tectonique, qui sont donc antérieures au Miocène (-23 Ma), et qui ne sont pas attendues pour le futur (cf. § 3.2.1 et 3.2.2). De plus, cette contribution reste faible au regard des processus d'infiltrations d'eau météoriques aux affleurements, continus depuis le Crétacé et qui vont perdurer dans le futur.

Les caractéristiques pétrophysiques, telles qu'elles sont observées à l'actuel sont donc acquises il y a au minimum 30 millions d'années. L'absence d'évolution récente du système est illustrée par l'absence de déséquilibre  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  dans les matrices carbonatées (Encadré 3.1) (Deschamps, 2003), même si un déséquilibre très discret a pu être mis en évidence au niveau des joints stylolithiques (Deschamps *et al.*, 2004), dans le Dogger mais également dans l'Oxfordien carbonaté, ce qui semble indiquer que ces joints ont pu contribuer récemment au transfert de fluide. Cette contribution reste cependant très locale, au sein des joints mêmes, et limitée en terme de flux, le déséquilibre étant faible.

D'une manière générale, ces processus diagénétiques importants, qui s'expriment régionalement à l'échelle de la bordure Est du Bassin de Paris, sont donc liés aux circulations de fluides au sein des calcaires. Ces processus de dissolution, près des zones d'affleurement, et de précipitation lorsque la formation est sous couverture, sont très dépendants des volumes de fluides mis en jeu et de leur renouvellement. Ils n'ont pas eu d'influence sur les ciments carbonatés des argilites du Callovo-Oxfordien, plus imperméables, ainsi que le montre la signature marine conservée de ces ciments (cf. § 3.3.1.3).

Ces processus diagénétiques sont responsables des faibles porosités (6 à 10 %) et des perméabilités globales du Dogger (de  $10^{-10}$  à  $10^{-9}$  m.s<sup>-1</sup>). Ils sont la cause de perméabilités plus faibles (de 1 à 2 ordres de grandeur) que celles renseignées au centre du bassin (Krakenberger, 1983), plus éloigné de l'influence des eaux météoriques. Seules quelques zones d'extensions plurikilométriques, isolées au sein des calcaires compacts et indépendantes du faciès, semblent moins affectées par ces phénomènes (Figure 3.3.15). Leurs porosités et leurs perméabilités sont alors sensiblement plus élevées (respectivement 15 % et  $10^{-8}$  m.s<sup>-1</sup>) que celles du reste de la formation. Les productivités de ces horizons poreux sont faibles : de l'ordre du litre par minute voire inférieures (Andra, 2004b). Les circulations profondes d'eau se font principalement au sein de ces derniers. À l'aplomb du site, les faibles perméabilités des carbonates font que ces écoulements sont lents : les modélisations hydrogéologiques indiquent des vitesses de l'eau (au sens de Darcy) de l'ordre de quelques centaines de mètres par million d'années (Trouiller & Benabderrahmane, 2005), beaucoup plus lentes (plus de deux ordres de grandeurs) que les vitesses moyennes régionales modélisées à l'échelle du bassin (Wei *et al.*, 1990). Ces vitesses correspondent à des distances de transfert convectif pour un soluté non sorbé de l'ordre de quelques kilomètres par million d'années.

Ces circulations profondes s'organisent à partir des affleurements, situés sur des zones de plateaux. Les écoulements à l'échelle du secteur dans le Dogger calcaire sont cohérents avec ceux observés à l'échelle du bassin : ils sont dirigés vers le centre de ce dernier, vers l'Ouest. (Figure 3.3.16) (IFP, 2004). D'une manière générale, le gradient de charge est très faible : de 0,2 à 0,4 pour mille au Nord-Est du secteur à 2 pour mille au Sud-Ouest, dans la région du forage EST322 (Figure 3.3.17).

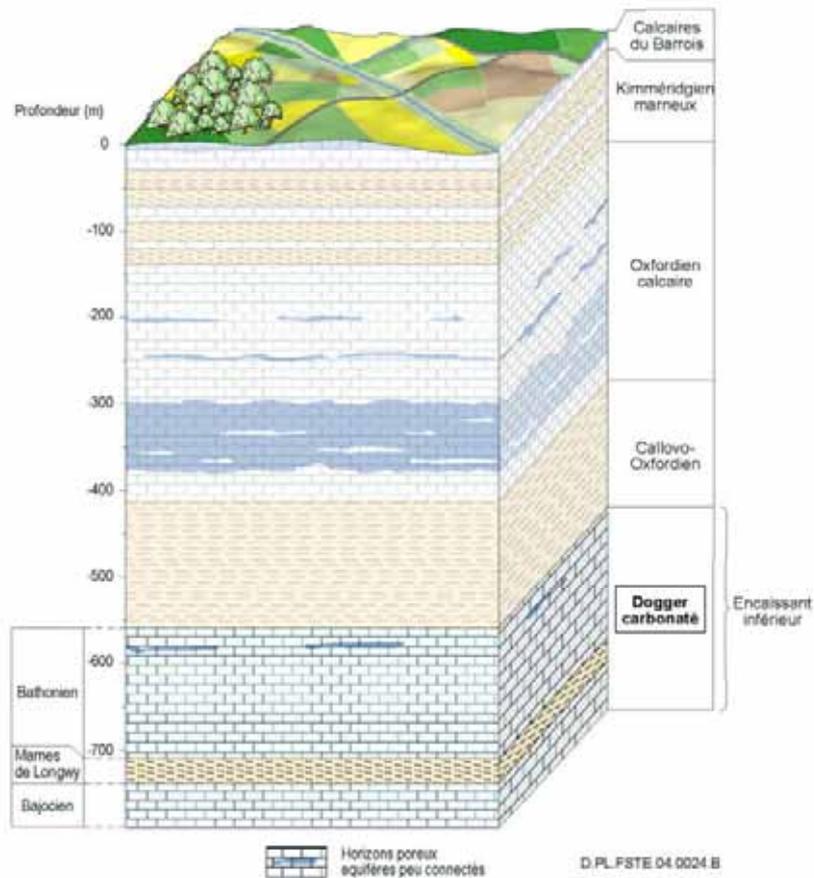


Figure 3.3.15 Représentation schématique des lithologies et des horizons poreux dans le Dogger calcaire sur le site de Meuse / Haute-Marne

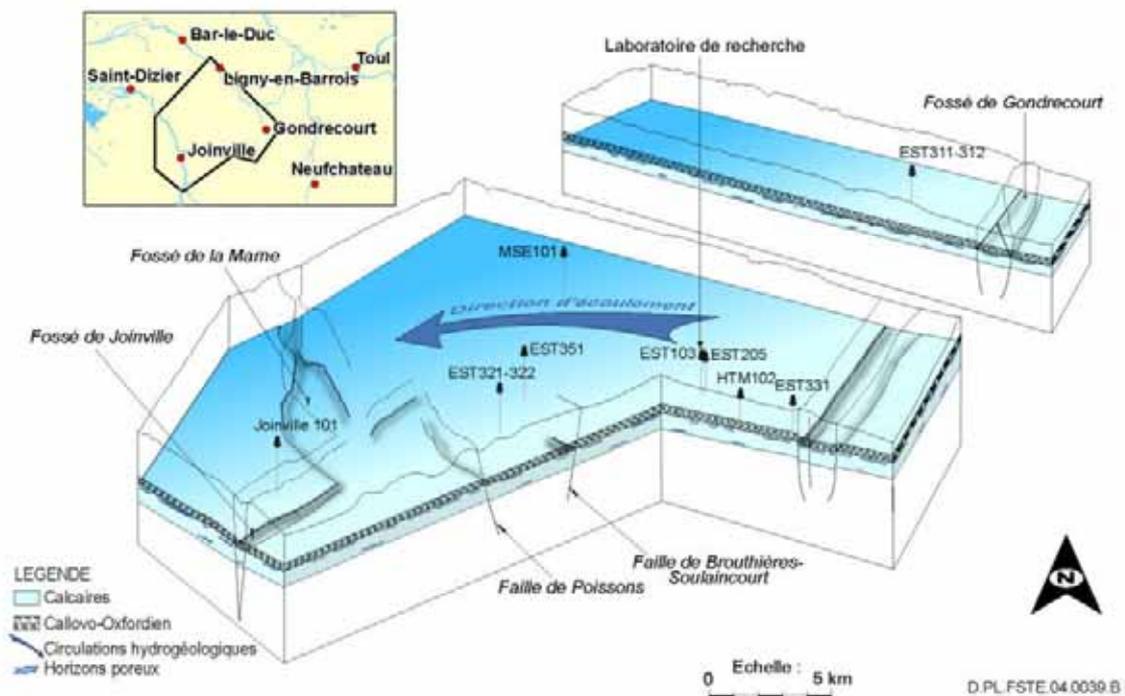


Figure 3.3.16 Organisation des écoulements d'eau dans le Dogger calcaire à l'état actuel

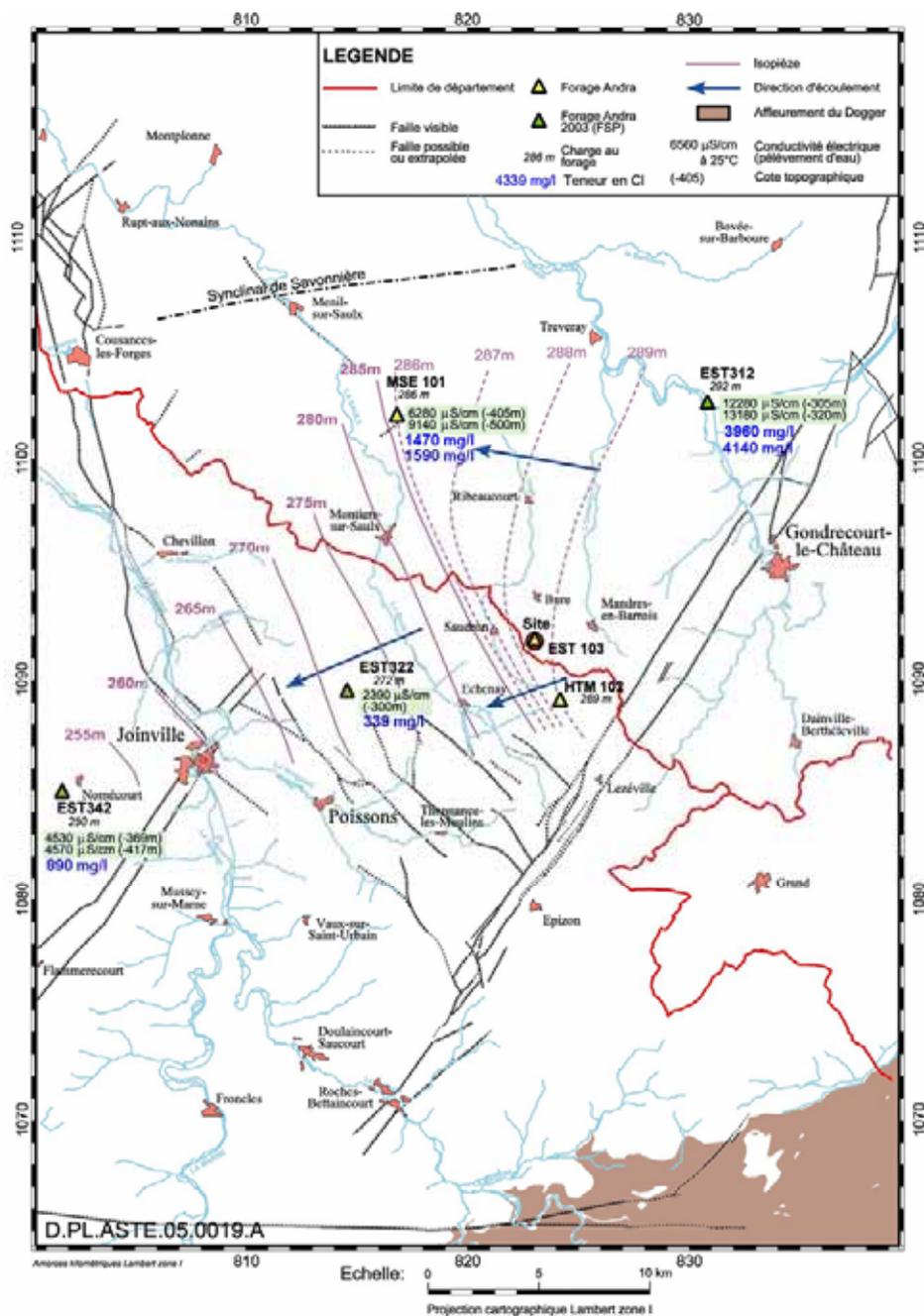


Figure 3.3.17 Champs de charge hydraulique et teneur en chlore des eaux du Dogger calcaire sur le secteur de Meuse / Haute-Marne

Les eaux du Dogger sont, à l'aplomb du site, à l'équilibre chimique avec la formation. Il s'agit d'eaux très minéralisées de type chlorurées-sulfatées-sodiques, montrant un pH neutre (légèrement supérieur à 7) et réductrices ; elles sont chimiquement proches de celles observées dans la même formation ailleurs dans le bassin (Andra, 2005h, chapitre 18). Ces eaux d'origine météorique (voir ci-dessus) montrent des temps de résidence longs (de l'ordre du million d'années dans le forage MSE101), ainsi que l'indiquent les approches menées à partir des gaz rares (Dewonck, 2000).

À l'échelle du bassin, comme déjà indiqué ci-dessus, les rejeux successifs des grandes failles régionales (faille de Bray notamment), et plus particulièrement les jeux associés aux phase fini-crétacée (-65 Ma) et oligocène (-34 Ma), semblent avoir facilité les transferts verticaux entre aquifères (Gonçalvès, 2002 ; Matray & Chery, 1995). À l'échelle de l'auréole orientale du bassin de Paris les

approches menées plus particulièrement à partir des isotopes de l'hélium (Marty *et al.*, 2003) montrent cependant que les argiles du Lias isolent efficacement les aquifères du Trias et du Dogger. Dans ce cadre, les signatures isotopiques triasiques retrouvées dans les calcites de remplissage de fractures à proximité des accidents apparaissent bien comme un phénomène très localisé, et correspondant à des communications très limitées dans le temps. Ceci est illustré par les différences de salinité existant entre les aquifères : de l'ordre de la centaine de  $\text{g.L}^{-1}$  pour le Trias (BRGM & ELF Aquitaine, 1976) à quelques  $\text{g.L}^{-1}$  pour le Dogger (cf. § 3.3.1.8). Les salinités du Dogger restent néanmoins élevées pour des eaux météoriques : elles semblent être acquises par diffusion du sel triasique au travers du Lias argileux (Andra, 2005h, chapitre 18). Ces échanges se font donc, à l'échelle du bassin, sur des échelles de temps longues, de plusieurs millions d'années. Les différences de teneurs en chlore du Dogger observées à l'échelle plus locale du secteur (de l'ordre de 4  $\text{g.L}^{-1}$  au Nord-Est à environ 0,3  $\text{g.L}^{-1}$  aux alentours de EST322, teneurs cohérentes avec les mesures de conductivités électriques, Figure 3.3.17) sont à relier à des circulations plus rapides qu'ailleurs sur le secteur permettant une dilution de ce sel triasique (cf. § 3.4.3).

### 3.3.2.2 L'Oxfordien carbonaté

Au-dessus du Callovo-Oxfordien, l'Oxfordien carbonaté montre des conditions de dépôt assez semblables à celles du Dogger : il s'agit, sur une épaisseur d'environ 300 mètres, de la superposition de différentes plateformes carbonatées (Figure 3.2.4). Cependant, les environnements de dépôt sont sensiblement plus contrastés que pour le Dogger. À la place d'une vaste plate-forme à fleur d'eau, très étendue, il est possible de distinguer, pour chacune des plates-formes de l'Oxfordien carbonaté, des environnements bien distincts. Ainsi, les faciès les plus grossiers et correspondant à de faibles tranches d'eau au moment du dépôt (sables argileux, faciès de lagon, récifs...) sont globalement situés au Nord-Est du secteur (région de Commercy) alors qu'au Sud-Ouest, au-delà de Joinville, se développent des faciès de bassin plus argileux (Trouiller & Benabderrahmane, 2005 ; Vincent, 2001) (Figure 3.3.18).

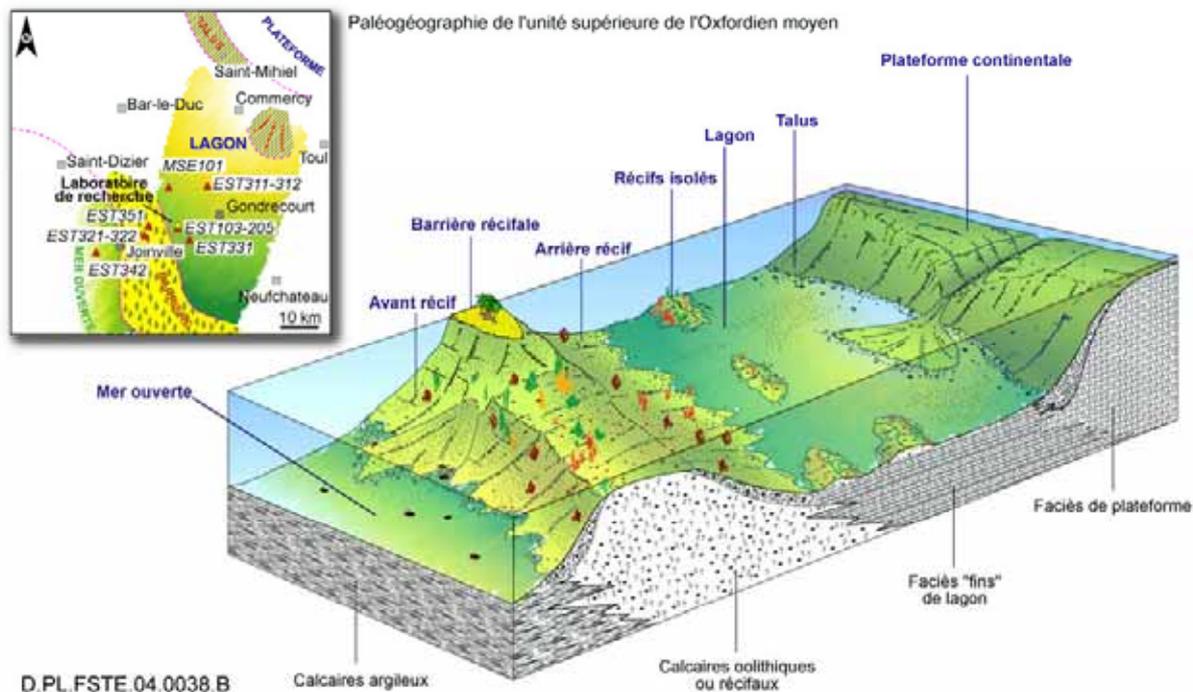


Figure 3.3.18 Environnement de dépôt d'une plateforme de l'Oxfordien carbonaté - Exemple de la plateforme terminale de l'Oxfordien moyen d'après (Carpentier, 2004 ; Université de Lyon I, 2002)

L'ensemble est affecté, sous couverture, par une diagenèse importante, à l'image de celle affectant le Dogger. Comme pour ce dernier, cette diagenèse est responsable d'une recristallisation plus intense au

niveau du secteur que dans les autres endroits du Bassin Parisien, notamment dans les faciès granulaires. Ainsi, sur la totalité de la formation, les perméabilités globales sont faibles : de l'ordre de  $10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ , soit deux ordres de grandeurs inférieures à celles mesurées plus au centre du bassin. Cependant, certains niveaux de l'Oxfordien carbonaté correspondant en majorité à des faciès fins montrent des porosités et perméabilités plus fortes que dans le reste de la formation. Ces horizons dits « poreux » sont définis à l'aplomb du laboratoire souterrain et identifiés par une numérotation de 1 à 7, soit Hp1 à Hp7. Ils correspondent principalement à certains faciès bien précis (boue carbonatée de lagon, faciès inter-récifaux,...), homogènes, pour lesquels une diagenèse « crayeuse » secondaire a transformé le faciès primaire en une micrite fine homogène, montrant une porosité élevée par rapport au reste de la formation (Trouiller & Benabderrahmane, 2005). L'organisation de ces niveaux poreux est donc directement liée aux conditions initiales de dépôt des sédiments ce qui explique leur géométrie globale et leur corrélation avec la stratification ainsi que le montrent les données de sismique 3D enregistrées sur le site (Figure 3.3.19). À cette échelle, ces données illustrent bien que la répartition des zones les plus poreuses peut cependant devenir irrégulière, expliquant ainsi les difficultés de corrélation de détail, sans toutefois modifier sensiblement les caractéristiques hydrodynamiques globales de la formation (Vigneron *et al.*, 2004).

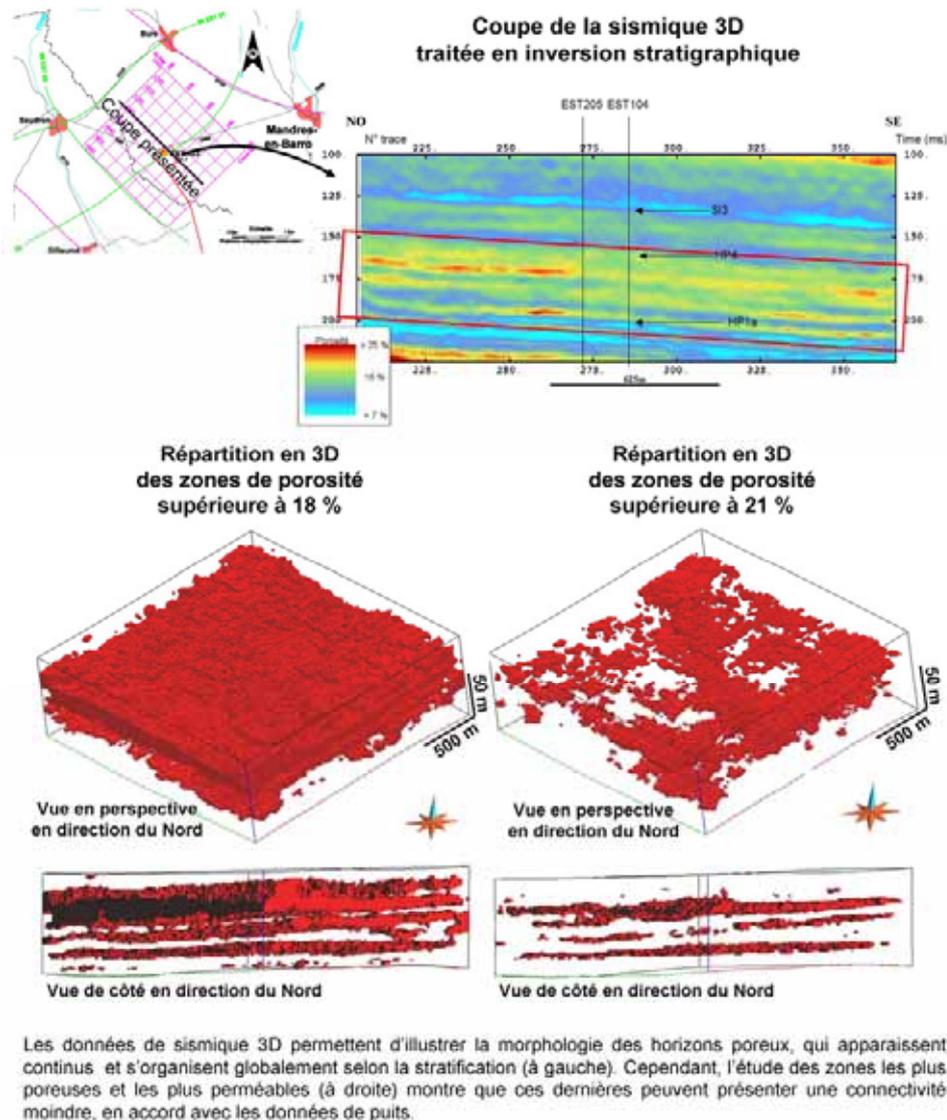


Figure 3.3.19 Morphologie des horizons poreux de l'Oxfordien carbonaté (Hp1 à Hp4) obtenue à partir des données de sismique 3D

À l'échelle du secteur, leurs répartitions, extensions et continuités, peuvent donc se déduire de la répartition des faciès sédimentaires correspondants (Carpentier, 2004 ; Université de Lyon I, 2002), même si, dans le détail, il semble difficile de les corrélérer finement. Ainsi, les connaissances régionales et les différentes données collectées dans les forages profonds réalisés à l'échelle du secteur permettent de définir en grand les extensions des principaux faciès poreux de la formation (Trouiller & Benabderrahmane, 2005). On distingue ainsi, au-dessus de faciès correspondant à la mise en place de la première plate-forme carbonatée, très peu perméables et présents sur l'ensemble du secteur (faciès C3a/C3b : perméabilité de l'ordre de  $10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$ ) :

- un ensemble d'horizons poreux (Hp1 à Hp4) reconnu dans toute la partie Nord-Ouest du secteur et correspondant en grande partie à des faciès de lagon (Figure 3.3.18). Ces horizons montrent des porosités de l'ordre de 20 % et des perméabilités maximum de 1 à quelques  $10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ . Ils s'individualisent au sein de calcaires plus compacts (porosités de 15 % et perméabilités de  $10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ ). À quelques kilomètres au Sud et à l'Ouest du site, les résultats des forages EST321 et EST351 montrent que le passage de ces faciès de lagon à des faciès de barrière recristallisés, puis, au-delà à des faciès argileux de bassin (région de Joinville) se traduit par la disparition de ces horizons poreux (Figure 3.3.20) ;
- dans l'Oxfordien supérieur, des horizons poreux (notés Hp5 à Hp7), plus minces que les horizons poreux inférieurs (Hp1 à Hp4), sont systématiquement rencontrés en forage, mais se corréleront difficilement d'un forage à l'autre. Il sont plus continus et mieux représentés dans la partie Nord-Est du secteur alors qu'ils n'existent pas systématiquement dans la partie Sud-Ouest (Trouiller & Benabderrahmane, 2005).

C'est principalement au sein de ces horizons poreux que les circulations d'eaux se font en profondeur, (Figure 3.3.20 et Figure 3.3.21). Les productivités mesurées en forage, sur l'ensemble des horizons poreux sont faibles : quelques litres par minute. Ces productivités peuvent cependant être supérieures lorsque la formation est proche de l'affleurement (dans les vallées par exemple, voir EST311 Andra, 2004b) ou lorsque des fractures sont présentes (EST321, cf. § 3.4.3). Du fait des faibles perméabilités de ces horizons poreux (quelques  $10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$  au maximum), les écoulements sont lents à l'aplomb du site : les modélisations hydrogéologiques montrent, sur la zone de transposition, des vitesses moyennes d'écoulement de l'eau (au sens de Darcy) de l'ordre du kilomètre par million d'années. Elles correspondent à des vitesses de transfert convectif d'un soluté non sorbé de l'ordre du kilomètre par centaine de milliers d'années. Ces vitesses de transfert sont confirmées par les analyses isotopiques (voir ci-dessous). Elles varient peu sur la zone de transposition, en raison des faibles variations du gradient de charge horizontal dont la valeur moyenne est de l'ordre de  $10^{-2} \text{ m.m}^{-1}$ .

Comme pour le Dogger, les écoulements régionaux sont globalement dirigés des zones d'alimentation que constituent les zones de plateaux au Sud et à l'Est du site, sur lesquelles la formation est karstifiée, vers le centre du bassin. Cependant, à partir du site, une partie de ces écoulements se dirige vers la vallée de la Marne, au Sud-Ouest, du fait de la mise à l'affleurement du toit des calcaires de l'Oxfordien dans cette vallée (Figure 3.3.22), (IFP, 2004 ; Trouiller & Benabderrahmane, 2005). Cette zone d'affleurement dans la vallée de la Marne représente, pour les trajectoires passant à l'aplomb du site de Meuse / Haute-Marne, le seul exutoire naturel actuel de l'aquifère de l'Oxfordien carbonaté sur le secteur.

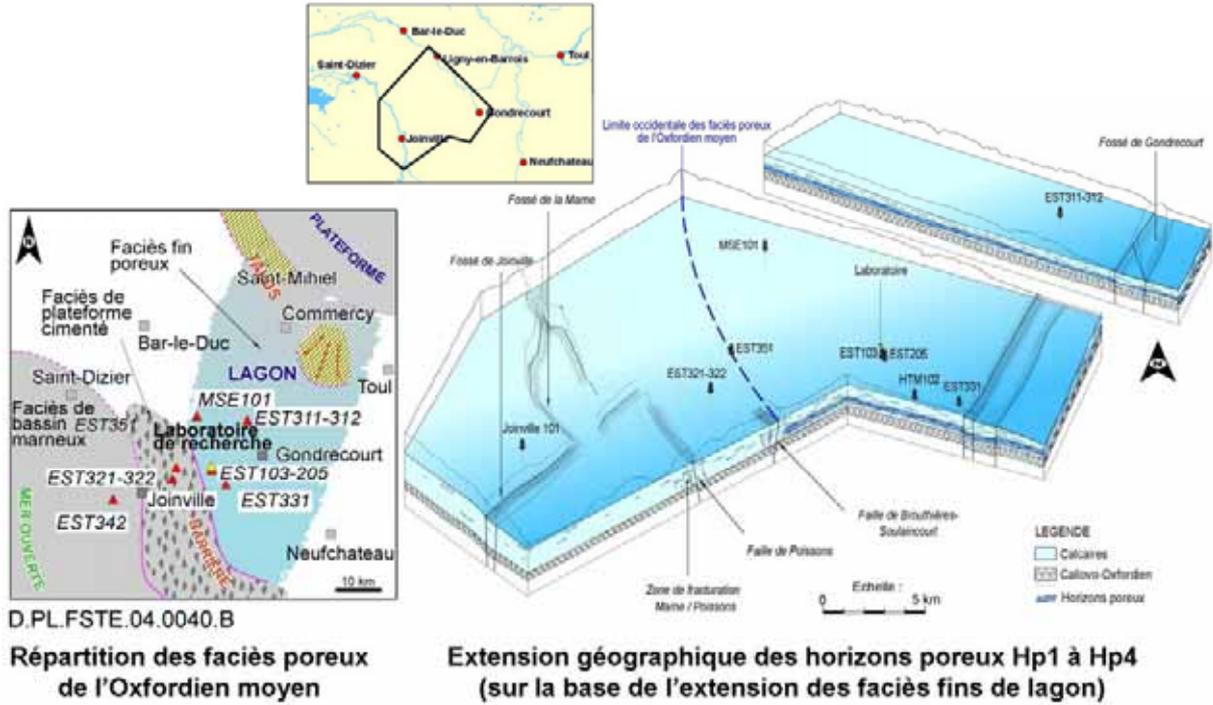


Figure 3.3.20 Extension des faciès poreux de l'Oxfordien moyen sur le secteur de Meuse / Haute-Marne

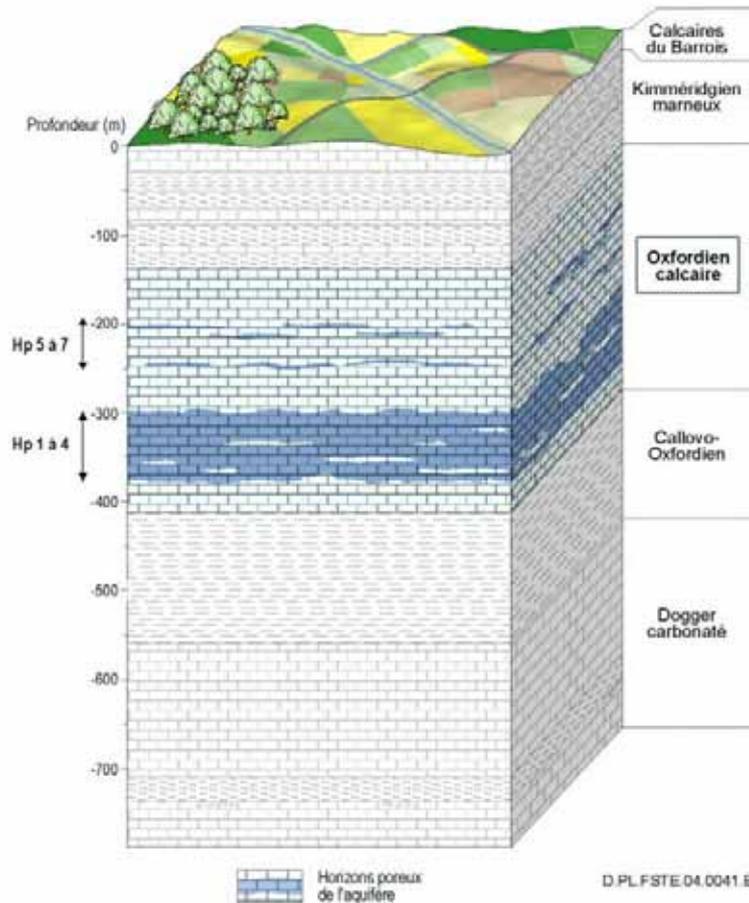


Figure 3.3.21 Représentation des niveaux poreux dans l'Oxfordien carbonaté à l'état actuel

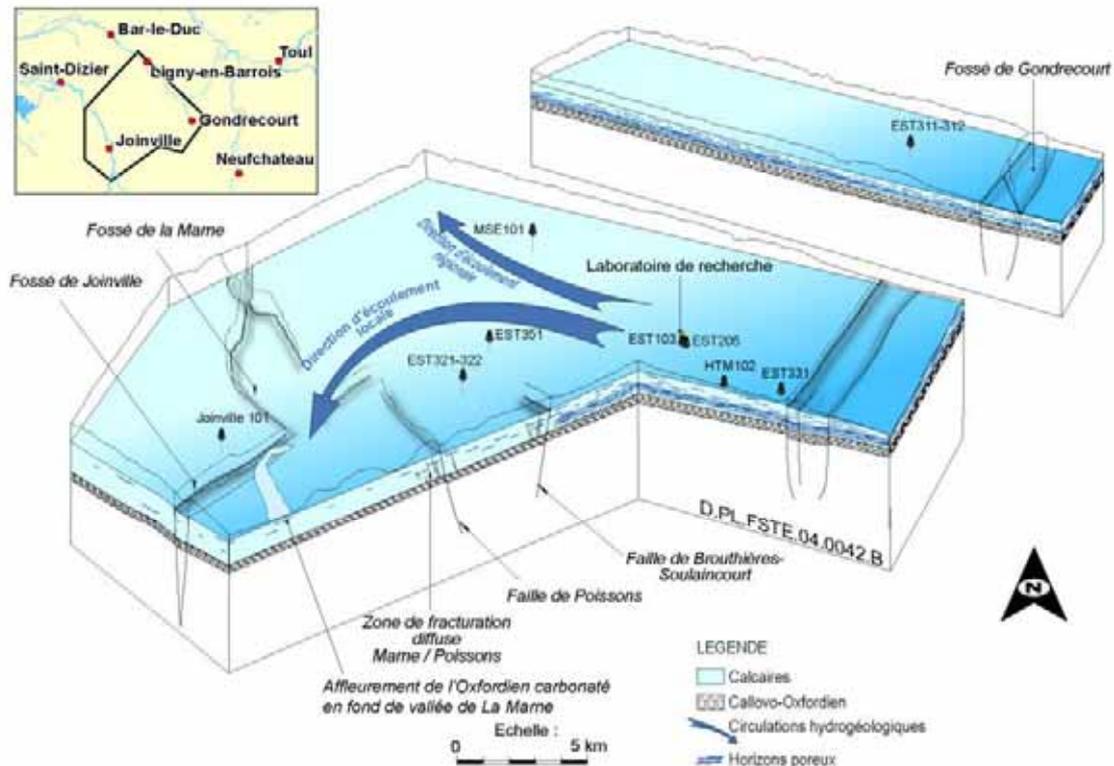


Figure 3.3.22 Organisation des écoulements d'eau dans l'Oxfordien carbonaté à l'état actuel

Une des conséquences de l'écoulement au sein d'horizons poreux bien différenciés dans l'Oxfordien carbonaté est une nette individualisation chimique, à l'aplomb du site, des eaux entre les horizons poreux inférieurs et les horizons poreux supérieurs (Trouiller & Benabderrahmane, 2005) :

- le faciès chimique des eaux des horizons inférieurs est sodique carbonaté ; elles sont réductrices, avec un pH neutre (7,5),
- le faciès des eaux des horizons supérieurs est magnésien carbonaté avec un pH de 7,5 également, mais elles montrent un caractère moins réducteur, voire faiblement oxydant.

Ces différences sont à relier à l'histoire géologique légèrement différente de ces deux ensembles, notamment vis-à-vis des environnements de dépôts, des paléocirculations et des processus diagénétiques. Mais il s'agit dans les deux cas d'eaux anciennes, d'origine météorique, peu salées (de l'ordre de  $1 \text{ g.L}^{-1}$ ) et géochimiquement évoluées, à l'équilibre avec la formation. La faible fracturation ouverte mise en évidence lors du suivi du creusement des puits d'accès (une seule structure productrice observée, de hauteur décamétrique, avec un faible débit -quelques  $10^{-2} \text{ l.mn}^{-1}$  - cf. § 3.4 et (Andra, 2004c)) ne permet donc pas, en grand, de transferts verticaux de fluides d'un ensemble d'horizons poreux à l'autre. Les analyses menées à partir des isotopes du chlore-36 indiquent, pour ces eaux, des âges de l'ordre de 400 000 ans à l'aplomb du site (Buschaert & Giffaut, 2005), confirmant ainsi les faibles vitesses de circulation (de l'ordre du kilomètre par 100 000 ans en moyenne) restituées par les modélisations hydrogéologiques (IFP, 2004 ; Trouiller & Benabderrahmane, 2005).

### 3.3.2.3 Le Kimméridgien marneux et les Calcaires du Barrois

Au-dessus de l'Oxfordien carbonaté, le Kimméridgien montre des faciès plus argileux. D'une épaisseur de 110 m d'épaisseur à l'aplomb du site, cette formation est constituée de marnes avec des intercalations de calcaires argileux (Figure 3.3.23). Ces faciès marquent un nouvel approfondissement de la profondeur d'eau lors du dépôt de la formation.

Ces conditions de dépôt, à l'image du Callovo-Oxfordien, expliquent la grande constance des faciès et de l'épaisseur de cette couche à l'échelle régionale. Lorsqu'elle est à l'affleurement, sa perméabilité, initialement faible sous couverture, de l'ordre de  $10^{-11}$  à  $10^{-12}$  m.s<sup>-1</sup> (Andra, 2003b), augmente jusqu'à des valeurs de l'ordre  $10^{-7}$  m.s<sup>-1</sup> du fait des altérations de surface affectant plus spécifiquement les intervalles carbonatés (Trouiller & Benabderrahmane, 2005).

Sous couverture, les eaux interstitielles du Kimméridgien montrent un faciès assez proche de celui des horizons supérieurs de l'Oxfordien carbonaté : eaux réductrices, de faciès bi-carbonaté magnésien et avec un pH de 7,5. À l'affleurement (ou sous couverture pour la partie au contact avec l'aquifère des Calcaires du Barrois), la formation est soumise à un environnement oxydant qui modifie profondément ce faciès (notamment, oxydation de la pyrite, avec production de sulfates et augmentation de la concentration en fer de la solution) et les eaux deviennent naturellement oxydantes (Andra, 2003b). Ces marnes séparent la nappe aquifère de l'Oxfordien carbonaté de celle des Calcaires du Barrois (Trouiller & Benabderrahmane, 2005).

A l'aplomb du site, le gradient de charge au travers de la formation est élevé, 0,4 m.m<sup>-1</sup>, confirmant ainsi le caractère semi-perméable, en grand et sous couverture, du Kimméridgien marneux (Andra, 2005a, situation 16).

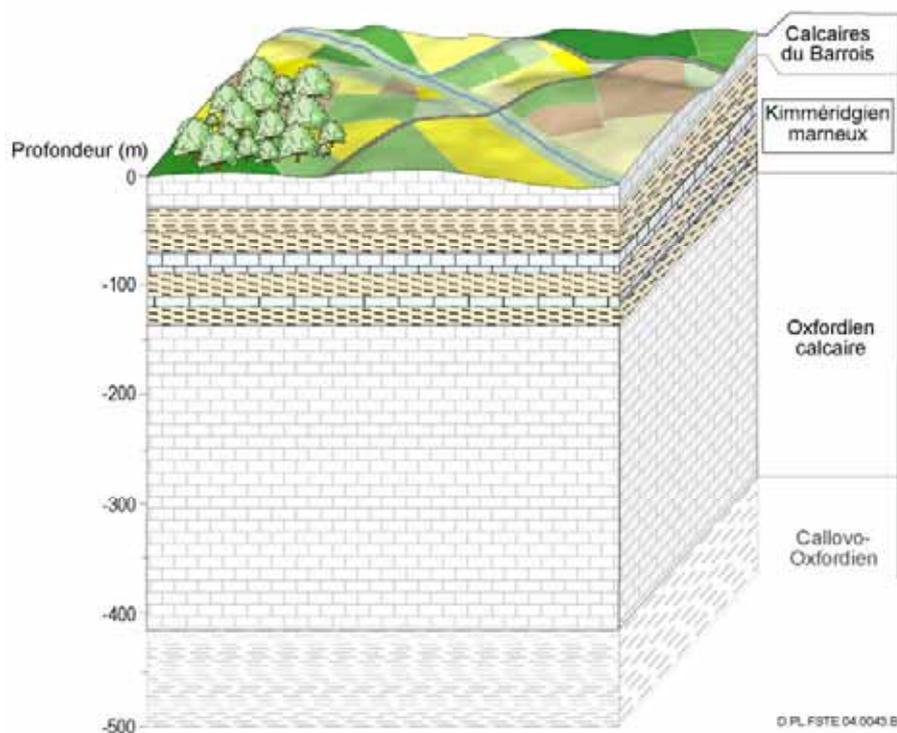


Figure 3.3.23 Représentation schématique du Kimméridgien marneux.

Les Calcaires du Barrois, qui sont à l'affleurement sur une grande partie du secteur, correspondent, à l'échelle du bassin de Paris, à la réinstallation des grandes plates-formes carbonatées à boues calcaires. La formation est épaisse de plus de 200 mètres lorsqu'elle est complète. La nature initiale du calcaire (calcaires argileux, plus ou moins vacuolaires) et son évolution à l'affleurement sous l'action des eaux météoriques permettent de séparer cette formation en deux unités aux comportements bien distincts (Figure 3.3.24) (Trouiller & Benabderrahmane, 2005) :

- une unité de base (représentative des environs du laboratoire) d'une épaisseur d'une trentaine de mètres dans laquelle les développements karstiques sont limités,

- une unité supérieure, d'une épaisseur pouvant atteindre la centaine de mètres, dans laquelle les karsts sont fréquents. Ils sont d'autant plus développés que du Crétacé argilo-sableux est préservé au-dessus de la formation (Brulhet, 2005b ; Trouiller & Benabderrahmane, 2005).

Quelle que soit l'unité considérée, les écoulements dans cet aquifère de surface fluctuent rapidement avec la pluviométrie. Les transferts, globalement en direction du Nord-Ouest, y sont rapides (plusieurs centaines à milliers de mètres par jour). Du fait de la recharge rapide de la nappe par les eaux météoriques, les eaux de formation sont oxydantes et montrent un faciès bicarbonaté calcique, plus ou moins chloruré (Andra, 2003c) et (Andra, 2005a, situation 17).

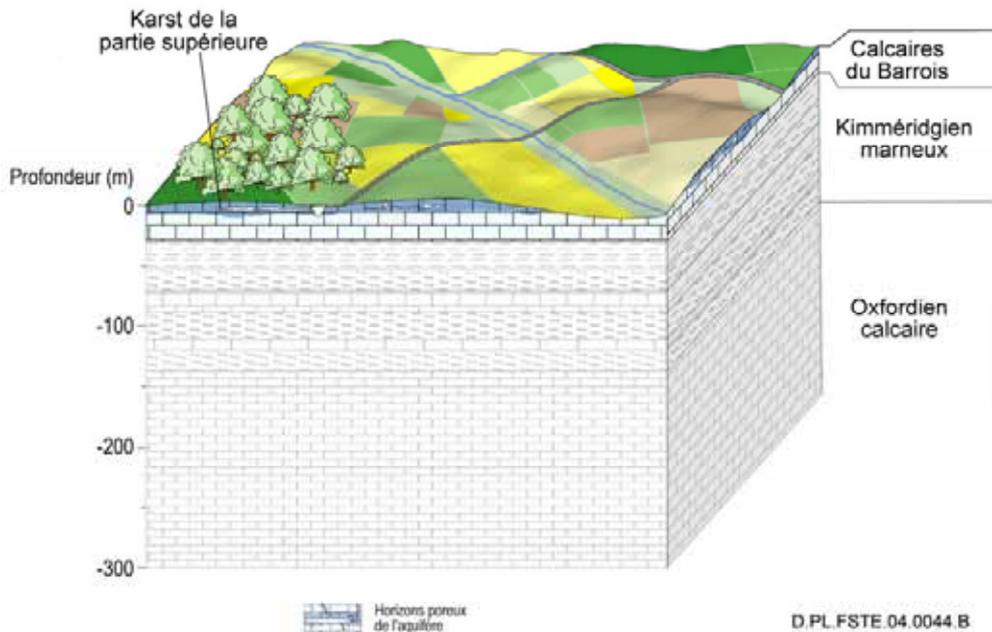


Figure 3.3.24 Représentation schématique des Calcaires du Barrois

### 3.4 La tectonique et la fracturation

#### 3.4.1 L'histoire tectonique du secteur

Le site de Meuse / Haute-Marne est situé dans une zone tectoniquement calme, à l'écart des régions marquées par les grandes phases tectoniques.

À l'échelle du secteur, seules les grandes failles (failles de la Marne, faille de Poissons, faille de Vittel), ancrées dans le socle et héritées de l'histoire antéjurassique, sont susceptibles de jouer essentiellement en extension durant le dépôt des couches du Dogger terminal et du Malm (Guillocheau *et al.*, 2002 ; Trouiller & Benabderrahmane, 2005), ces jeux étant par ailleurs mal documentés à l'échelle du bassin (Guillocheau *et al.*, 2000). Durant le Crétacé, ces rejeux sont plus compliqués, alternativement en extension puis en compression (Guillocheau *et al.*, 2000).

C'est réellement à partir de la fin du Crétacé et durant le Tertiaire que le schéma structural, tel qu'il est observé aujourd'hui, se met en place (Bergerat, 1985) et (Andra, 2005h, chapitre 9) :

- la phase pyrénéenne (autour de -65 Ma), qui correspond à la mise en place d'un régime compressif Nord/Sud à Nord-Est/Sud-Ouest, remobilise ces accidents en décrochement (jeu horizontal) ;
- à ce régime compressif succède, à partir de la fin de l'Eocène et au début de l'Oligocène (-34 Ma), un régime extensif grossièrement orienté Est-Ouest. Ce dernier est responsable, notamment, de la

formation du fossé rhénan. Sur le secteur, ce régime entraîne un rejeu des failles existantes en extension et la création de nouvelles structures Nord-Nord-Est/Sud-Sud-Ouest (fossé de Gondrecourt, fossé de Joinville), ancrées dans les couches salifères du Trias ;

- enfin, depuis le début du Miocène (-23 Ma), la région est soumise à un régime compressif, correspondant à la poussée alpine, d'orientation globalement Nord-Ouest/Sud-Est, remobilisant épisodiquement les failles en décrochement. Ce régime, qui perdure jusqu'à aujourd'hui (cf. § 3.2.5), est responsable d'une surrection tectonique qui affecte l'ensemble du bassin à l'actuel. Les évaluations des vitesses de cette surrection sur le secteur du site de Meuse / Haute-Marne (à partir de la dynamique de l'enfoncement des vallées) sont estimées à une centaine de mètres par million d'années (Brulhet, 2005b). Ces évaluations sont cohérentes avec celles données à l'échelle du bassin (Pomerol, 1978).

### 3.4.2 Les échelles de fracturation du secteur de Meuse / Haute-Marne

La fracturation du secteur, résultant de cette histoire tectonique, s'exprime selon différentes échelles (Andra, 2005h, chapitre 9).

- Les failles régionales (failles de la Marne, faille de Poissons, fossé de Gondrecourt et fossé de Joinville, faille de Vittel) encadrent le secteur (Figure 3.4.1). Ces failles, d'un rejet vertical de l'ordre de la cinquantaine de mètres, voire supérieur, traversent toute la série jurassique. Elles absorbent l'essentiel de la déformation qui a affecté le secteur, ainsi que le montre leur histoire correspondant aux grandes phases tectoniques et la faiblesse des déformations hors de ces zones de failles.
- Les failles secondaires affectent également la totalité de la série jurassique, mais avec des rejets verticaux et des extensions moindres. Elles montrent une évolution similaire aux failles régionales auxquelles elles sont associées. Elles se situent ainsi plus particulièrement au Sud du site, autour de la faille de Poissons, dans une zone reliant les failles de la Marne et le fossé de Gondrecourt (Figure 3.4.1).
- Les failles mineures (rejet inférieur à 5 m) représentent une famille de fracturation qui n'est pas observée à ce jour sur le secteur dans les sondages. Elle est hors d'atteinte des moyens d'investigation classiques de sismique 2D. La mise en œuvre de sismique 3D permet, pour sa part, de détecter des objets tectoniques avec des rejets jusqu'à deux mètres. Ainsi, sur le site même du laboratoire, aucune de ces structures de ce type n'a pu être mise en évidence, constat confirmé par les forages déviés réalisés lors de la campagne FRF (Andra, 2004a). Par analogie avec les failles secondaires, ces failles mineures, qui montreraient un espacement plurikilométrique et des extensions potentielles de quelques centaines de mètres, sont susceptibles d'affecter plusieurs formations à la fois (Elion, 2005 ; Trouiller & Benabderrahmane, 2005). Elles devraient préférentiellement être rencontrées à proximité des accidents régionaux. Les concepts de stockage (et notamment la modularité de l'architecture de celui-ci) permettent de s'affranchir de leur existence éventuelle, jugée peu probable sur la zone de transposition (Elion, 2005).
- À une plus petite échelle, les microstructures correspondent à des objets montrant de faibles rejets (bien inférieurs au mètre) et de faibles extensions (plurimétrique à décamétrique). Le terme de « microstructures » permet de regrouper des objets très variés (tels que les diaclases et les fentes de tension) qui sont autant de discontinuités au sein des couches. Leur origine peut être soit tectonique, soit liée à l'histoire diagénétique du sédiment (expulsion d'eau par exemple). Leur répartition est donc liée à la fois à la localisation géographique (proximité des failles) mais également à la nature même du sédiment (argilite ou calcaire) et à son comportement propre au cours de l'histoire géologique.

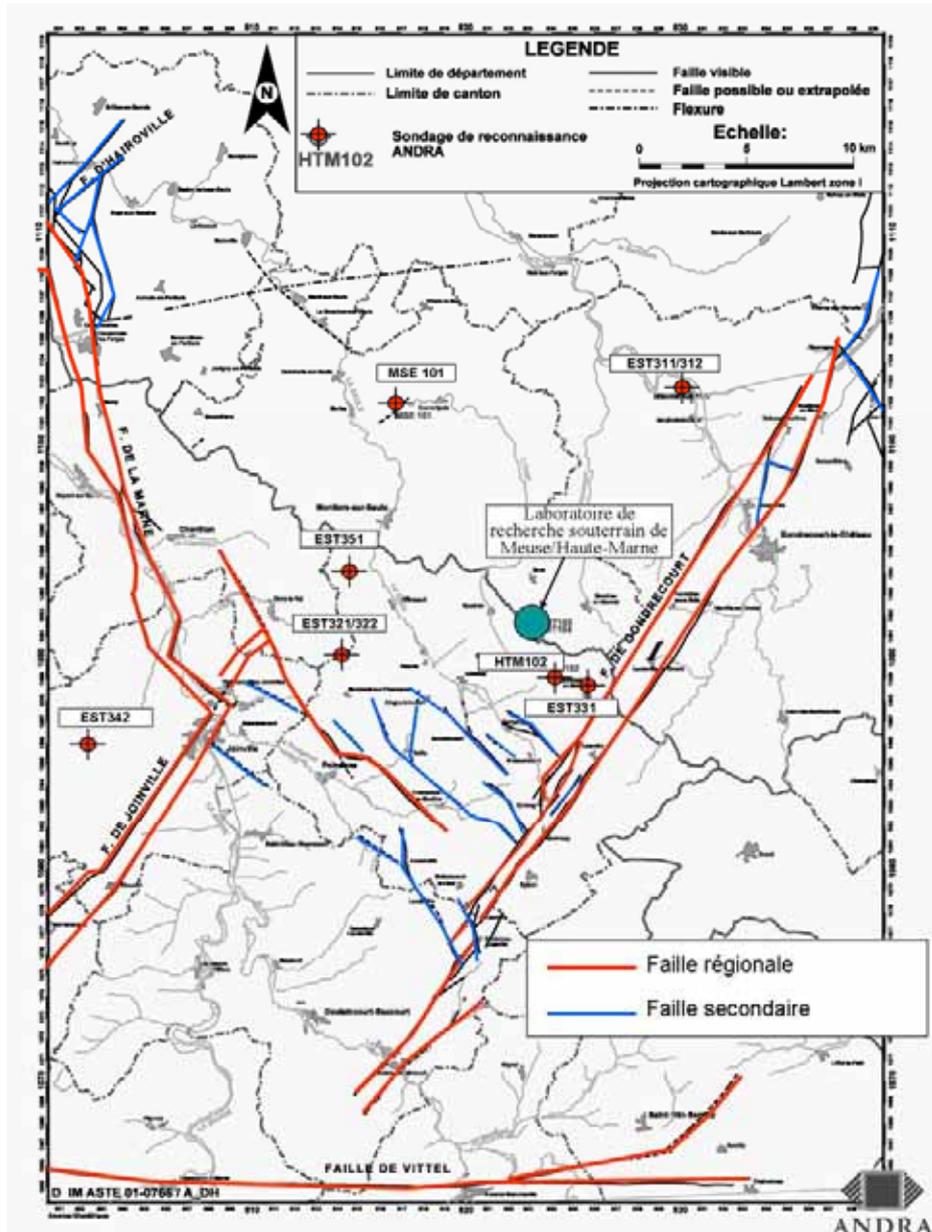


Figure 3.4.1 Les différentes structures tectoniques sur le secteur de Meuse / Haute-Marne

Ainsi, dans les carbonates du Dogger et de l'Oxfordien (Trouiller & Benabderrahmane, 2005), ces microstructures montrent, à l'affleurement, une densité plus forte près des failles régionales (2 à 4 diaclases par mètre). Sous couverture, et lorsque l'on s'éloigne des accidents, la microfracturation observée reste forte à l'échelle du secteur (espacement typiquement infra- à métrique). Elle est cependant fréquemment colmatée par de la calcite comme le montrent les observations durant les travaux de construction des ouvrages d'accès au laboratoire souterrain (Andra, 2004c).

Dans le Callovo-Oxfordien, les microstructures sont rares : quelques dizaines de microstructures, sans mouvement, ont été rencontrées sur plus de 1 300 m de forages carottés. Ces structures sont le plus souvent colmatées par de la calcite ou de la célestine, montrant ainsi une cimentation précoce, lors de la compaction (Andra, 2004a ; Elion, 2005). Les investigations par forages inclinés menées sur le site montrent un espacement plus faible entre structures dans la partie supérieure (évalué à une trentaine de mètres environ) que dans le reste de la couche (hectométrique) et souligne l'influence de la lithologie sur la répartition des microstructures (faciès supérieurs de la couche, plus carbonatés et donc plus fragiles) (Andra, 2004a ; Elion, 2005) (Figure 3.4.2).

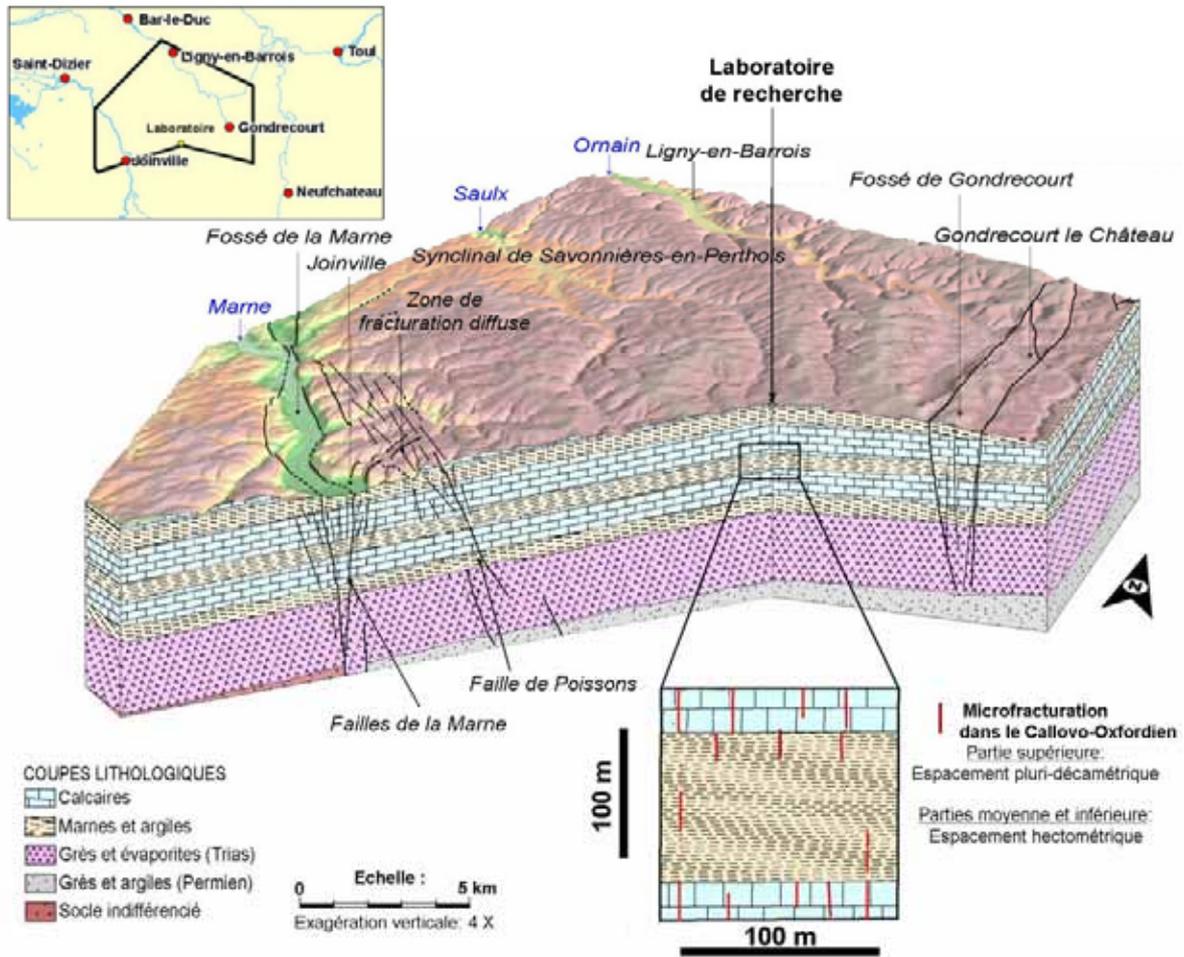


Figure 3.4.2 Représentation de la microfracturation dans le Callovo-Oxfordien

D'autre part, les données de sismique 3D (Andra, 2005h, chapitre 9) ont mis en évidence, dans le Bajocien et le Bathonien des structures, orientées N120°E, qui auraient pu être interprétées en terme de fracturation. Elles montrent un « rejet » apparent maximum (de l'ordre de 3 à 4 mètres) au mur des marnes de Longwy, puis s'atténuent rapidement vers le haut où elles sont apparemment scellées dans le Bathonien et n'ont *a fortiori* plus aucune influence au toit du Dogger calcaire. À l'échelle de la résolution de la sismique 3D, elles n'affectent donc pas la base du Callovo-Oxfordien argileux, aucun décalage, même minime, de l'horizon du toit du Dogger calcaire n'étant visible. L'un des objectifs de la campagne de forages FRF était de reconnaître ces structures et d'évaluer leur impact potentiel, en terme de microfracturation non détectable par la sismique, sur la couche du Callovo-Oxfordien (Andra, 2004a). Les résultats des forages, remis en perspectives avec les données de sismique 3D et les investigations géophysiques en forage, ont permis d'interpréter ces structures en liaison avec des constructions récifales au toit du Bajocien, ces dernières pouvant d'ailleurs être contrôlées par des failles dans les formations sous-jacentes préexistantes au moment de l'installation de ces constructions (Andra, 2005h, chapitre 9). Les forages confirment :

- l'amortissement dans le Bathonien de la microfracturation se développant à l'aplomb de ces structures, interprétée comme des figures de compaction,
- l'absence de fracturation et de microfracturation au sein même du Callovo-Oxfordien associée à ces structures.

### 3.4.3 La zone de fracturation diffuse Marne/Poissons

Les forages EST321 et EST322 ont rencontré, dans l'Oxfordien carbonaté, des venues d'eau, associées à des diaclases d'orientation générale N150° et d'ouverture infracentimétrique à centimétrique, conduisant à des transmissivités globales, déduites d'essais de pompage, de trois ordres de grandeur supérieurs à celles des autres forages du secteur. Ces structures, d'origine tectonique, ainsi que le montre leur orientation préférentielle, ont été élargies par des phénomènes de dissolution (Andra, 2004b ; Andra, 2004c). Les forages EST 321 et EST322 sont situés à proximité de la faille de Poissons et dans le prolongement d'un réseau de failles secondaires, toutes orientées selon une direction N150°E (Figure 3.4.1). Cet ensemble d'accidents se développe, au Sud-Ouest du site, entre le fossé de Gondrecourt et les failles de la Marne. La faille de Poissons et ces failles secondaires sont bien identifiées à la fois sur les sections sismiques existantes, qui montrent qu'elles traversent l'ensemble de la série jurassique, et également en surface. Les résultats de ces forages, confirment donc les observations réalisées aux affleurements indiquant que la microfracturation est plus développée dans les encaissants carbonatés à proximité des failles (cf. § 3.4.2).

Les mesures hydrauliques aux forages EST321 et 322 montrent :

- une différence de charge de 6 m entre le Dogger et l'Oxfordien carbonaté, du même ordre de grandeur que celle observée sur le site (cf. Figure 3.3.12),
- des eaux de formation du Dogger et l'Oxfordien carbonaté avec des caractéristiques géochimiques très différentes l'une de l'autre (plusieurs ordres de grandeur sur les teneurs en chlorures par exemple – de 300 mg.L<sup>-1</sup> pour le Dogger et inférieure à 2 mg.L<sup>-1</sup> pour l'Oxfordien carbonaté).

Ces éléments indiquent, qu'en dépit de failles identifiées par la sismique au sud-est de ces forages et sur toute l'épaisseur de la série, y compris dans le Callovo-Oxfordien, ce dernier joue toujours dans cette zone, son rôle de barrière semi-perméable entre le Dogger et l'Oxfordien carbonaté. Les différentes failles identifiées, et les diaclases mises en évidence dans les forages, ne créent donc pas de court-circuit entre le Dogger et l'Oxfordien.

Toutes les eaux de l'Oxfordien carbonaté du secteur ont un âge supérieur à 40 000 ans d'après les résultats des analyses du <sup>14</sup>C (Encadré 3.1). Néanmoins, les analyses des isotopes stables montrent que l'eau de EST321 est sensiblement plus jeune que celles des autres forages du secteur (notamment EST311 et MSE101, situés, comme EST321 en aval hydraulique du site) (Andra, 2004b). La chlorinité des eaux de l'Oxfordien carbonaté sur le secteur diminue avec l'âge relatif de ces eaux, les teneurs les plus faibles étant observées dans le sondage EST321 (inférieure à 2 mg.L<sup>-1</sup>). Ces résultats indiquent une dilution des eaux de l'Oxfordien carbonaté par des eaux météoriques récentes dans la zone du forage EST321. L'âge apparent des eaux échantillonnées reste cependant supérieur à 40 000 ans. Cette dilution est à relier aux structures transmissives mises en évidence dans l'Oxfordien carbonaté dans ce forage, et à l'existence possible de liaisons de l'aquifère carbonaté avec la surface à proximité de EST321.

Il est à noter que, pour le Dogger, les résultats des analyses géochimiques et isotopiques montrent les mêmes tendances. En effet, toutes les eaux du Dogger du secteur sont anciennes, mais les analyses comparatives des isotopes stables montrent que celles de EST322 sont les plus jeunes (Andra, 2004b). La variation de salinité du Dogger s'organise de la même manière que dans l'Oxfordien carbonaté, mais avec des teneurs en chlorures plus élevées, de l'ordre de 4 g.L<sup>-1</sup> au EST312, au Nord-Est et de l'ordre de 0,3 g.L<sup>-1</sup> au forage EST322 (Figure 3.3.17). Ces résultats suggèrent des circulations également plus rapides dans le Dogger de cette zone, permettant une dilution plus importante des chlorures remontant par diffusion des horizons triasiques. Cependant, le forage EST322 n'a pas mis en évidence de fracturation dans le Dogger, ce qui ne permet pas de relier de manière directe, ces écoulements plus rapides à une éventuelle microfracturation transmissive.

Ces différents éléments sont donc à la base de la représentation d'une zone de fracturation diffuse dans laquelle la fracturation et la microfracturation sont, du fait de la proximité de failles, potentiellement plus intenses dans les carbonates, notamment ceux de l'Oxfordien, permettant des écoulements plus rapides que ceux observés ailleurs sur le secteur. Cette fracturation diffuse s'organise probablement en « couloirs » orientés N150° ce qui signifie qu'elle n'est pas présente partout au sein de cette zone. Elle n'a pas d'influence sur les propriétés hydrodynamiques du Callovo-Oxfordien et, à ce titre, elle ne modifie pas le fonctionnement global du système hydrogéologique du secteur. Seuls, les temps de résidence des eaux dans les formations carbonatées sont localement affectés. Cependant, ces derniers restent longs (supérieurs à 40 000 ans minimum) étant donnés les résultats des analyses du  $^{14}\text{C}$  (Andra, 2004b ; Andra, 2004c).

La taille des objets concernés n'en permet pas une représentation déterministe. Les limites de cette zone visent avant tout à définir un périmètre au sein duquel les probabilités de rencontrer de telles structures sont plus fortes (cf. la représentation probabilistique qui en a été faite pour les besoins des modélisations hydrogéologiques IFP, 2004). Ces limites (Figure 3.4.3), qui correspondent plus à une « enveloppe », restent approximatives étant donné le faible nombre de points de contrôle. Elles sont fondées, d'une part sur les structures tectoniques reconnues en surface et sur la sismique et d'autre part, sur les résultats des forages. Le forage EST351, qui montre dans l'Oxfordien carbonaté des débits du même ordre de grandeur que ceux mesurés ailleurs sur le secteur ( $20 \text{ l.mn}^{-1}$ ), en est exclu. Ces éléments permettent de définir une limite Nord-Est de la zone selon la direction des failles de surface, passant approximativement dans la vallée de la Saulx pour sa partie Sud et se prolongeant jusqu'aux failles de la Marne. Cette zone de fracturation diffuse, tracée en fonction de la proximité des accidents reconnus en surface et en sismique, se développe à l'extérieur de la zone de transposition (Encadré 3.2), cette dernière étant, par définition, éloignée des zones de failles.

D'une manière générale, la représentation de cette zone, reposant en grande partie sur les résultats des forages de la plateforme EST321/322 reste à confirmer.

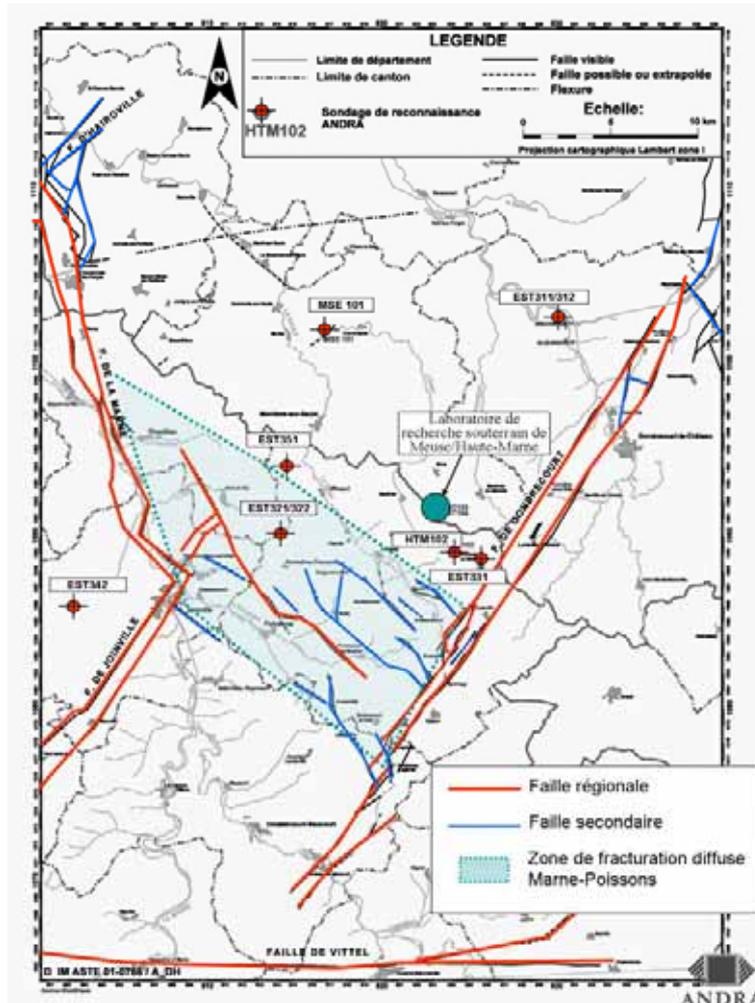


Figure 3.4.3 Limites de la zone de fracturation diffuse Marne/Poissons

### 3.4.4 L'impact de la fracturation sur les propriétés hydrauliques des formations

Parmi toutes ces échelles de fracturation, seules les failles régionales peuvent avoir un rôle hydraulique affectant l'ensemble des formations. Si leurs rejets verticaux, au maximum de l'ordre de la centaine de mètres, ne sont pas susceptibles de mettre en regard des formations aquifères différentes (Dogger au même niveau que l'Oxfordien carbonaté, par exemple), en revanche, elles peuvent jouer un rôle de limite étanche (en mettant en vis-à-vis une formation aquifère et un semi-perméable) ou un rôle de drain vertical susceptible d'équilibrer les charges entre aquifères différents.

Hors de la zone de fracturation diffuse et d'une manière générale lorsque l'on s'éloigne des accidents tectoniques, la microfracturation dans l'Oxfordien carbonaté ne crée pas de transfert vertical de fluides (cf. § 3.3.2.2), ainsi que le montrent les différences de composition des eaux entre les horizons poreux inférieurs et supérieurs. Le suivi du fonçage des puits n'a permis de mettre en évidence qu'une seule structure transmissive, d'extension plurimétrique, dans cette formation (Andra, 2004c), montrant bien le peu d'impact, en grand, de la microfracturation sur le schéma d'écoulement dans l'Oxfordien carbonaté, contrôlé essentiellement par les horizons poreux. Néanmoins, cette microfracturation semble suffisante pour permettre une continuité hydraulique transmettant la charge sur l'ensemble des horizons poreux.

Dans le Dogger, aucune structure transmissive n'a été rencontrée en forage. Étant donné les fortes recristallisations de calcite observées, de manière générale, dans la microfracturation de cette formation sur le secteur, celle-ci ne joue donc pas de rôle dans les écoulements. Les temps longs de résidence des eaux dans cette formation sont par ailleurs, comme pour l'Oxfordien, peu compatibles avec des écoulements au travers d'un réseau fracturé (cf. § 3.3.2.1). Un éventuel impact d'une microfracturation dans le Dogger ne peut donc se concevoir que très localement, à proximité des failles.

Dans le Callovo-Oxfordien, les tests hydrauliques réalisés sur différents intervalles, et notamment au droit des rares structures mises en évidence dans la partie supérieure de la formation (structures cimentées par de la calcite ou de la célestine, cf. § 3.4.2), montrent l'absence d'impact de ces dernières sur la perméabilité de la couche (Andra, 2004a ; Elion, 2005).

Ainsi, étant donné :

- l'éloignement par définition (Encadré 3.2) de la zone de transposition des accidents régionaux et des zones associées à des accidents reconnus en surface (donc de la zone de fracturation diffuse),
- l'absence d'impact des rares microstructures reconnues sur la perméabilité du Callovo-Oxfordien, ainsi qu'un gradient de charge vertical imposé par les encaissants excluant des structures transmissives au travers de ce dernier,
- le faible rôle des microstructures vis-à-vis des écoulements dans les encaissants hors de la zone de fracturation diffuse et de la proximité des failles, ces écoulements, essentiellement horizontaux, étant contrôlés par des horizons poreux s'organisant, en grand, selon la stratification,

il n'y a pas, au sein de la zone de transposition, de modification attendue des propriétés de la couche ou des encaissants carbonatés due à la fracturation.

### **3.5 L'environnement de surface**

Le climat du site, le substratum géologique et l'hydrogéologie du secteur déterminent le modelé géomorphologique du site. Ces éléments conditionnent les sols et l'hydrologie de surface et donc, la faune, la flore et les activités humaines. Le terme d' « environnement de surface » ou encore de « biosphère » regroupe l'ensemble de ces composants (Texier & Leclerc-Cessac, 2005).

#### **3.5.1 Le climat**

Dans cette partie de l'Est de la France, le climat est de type tempéré-océanique. Par leur orientation Nord-Sud et leur altitude (supérieure à 300 mètres), les côtes de Meuse forment un premier barrage aux masses d'air provenant de l'Ouest et du Sud-Ouest (vents dominants) et ayant traversé le Bassin Parisien. L'ascendance forcée se traduit par une pluviométrie importante (jusqu'à 1 000-1 100 mm.an<sup>-1</sup>) répartie tout au long de l'année. Localement, les vallées importantes (Marne, Meuse, Moselle) bénéficient d'une pluviométrie moins forte, de l'ordre de 700 mm.an<sup>-1</sup> (Andra, 2005a, situation 2).

Les températures moyennes annuelles actuelles oscillent autour de 10 °C avec des minima journaliers de -2 °C en hiver, et des maxima de 24 °C en été (Figure 3.5.1). L'humidité de l'air est forte : de l'ordre de 75 % en été et de 85 à 87 % en hiver (Andra, 2005h, chapitre 14).

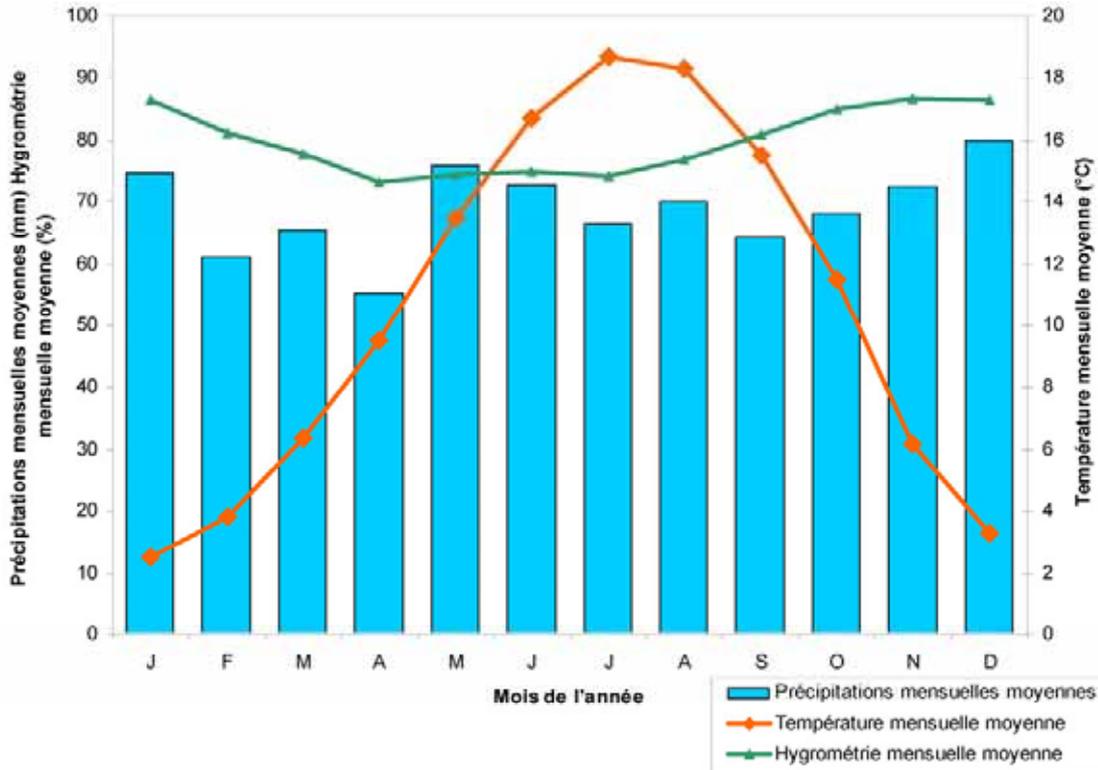


Figure 3.5.1 Variation de la température et de la pluviométrie moyennes à Saint-Dizier

### 3.5.2 Du substratum géologique au modelé géomorphologique

L'alternance, à l'affleurement sur le secteur, de couches argileuses tendres et calcaires résistantes ainsi que le pendage général des couches vers l'Ouest et le Nord-Ouest sont à l'origine d'un paysage typique de côtes permettant de reconnaître, du Sud et de l'Est vers le Nord-Ouest (Brulhet, 2005b) :

- le plateau de l'Oxfordien carbonaté, formant les côtes de Meuse se développant en surplomb de la dépression créée par les argiles du Callovo-Oxfordien (Figure 3.2.6),
- plus à l'Ouest, la dépression marneuse correspondante au Kimméridgien, au sein de laquelle les intervalles de calcaires argileux forment de petites buttes très visibles dans le paysage (Figure 3.2.6 et Figure 3.5.2),
- les Calcaires du Barrois, sous la forme d'un vaste plateau, couronné par les placages de Crétacé inférieur (sables et argiles rouges) et entaillé par des rivières. À l'Est du site, quelques buttes témoins de Calcaires du Barrois jalonnent le fossé de Gondrecourt (Figure 3.5.2).

Ce relief est le résultat d'une évolution continue depuis l'exondation du secteur, à la fin du Crétacé, et liée à l'évolution tectonique.

Depuis 3 Ma, l'alternance de cycles glaciaire-interglaciaire a fait qu'à cette évolution d'origine tectonique se superposent des modifications périodiques, liées à la cyclicité des évolutions climatiques (Brulhet, 2005b). Ces dernières concernent notamment la mise en place et le retrait d'un pergélisol. La dynamique de ces évolutions est présentée dans le § 9.3.

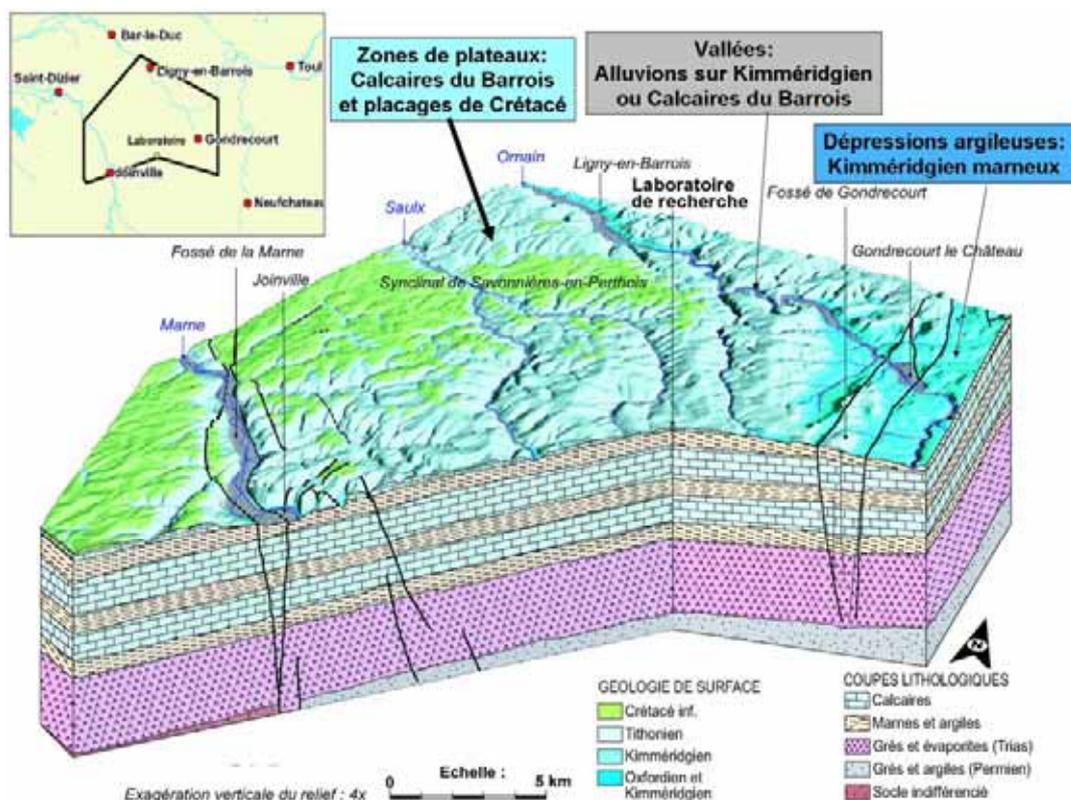


Figure 3.5.2 Les différents modelés morphologiques autour du site de Meuse / Haute-Marne à l'actuel

### 3.5.3 Les ressources en eau (l'hydrologie de surface et l'hydrogéologie)

La topographie contrôle les écoulements de surface, les eaux superficielles ayant tendance à rejoindre le pied des côtes. À l'Ouest du secteur, la région est drainée vers le Nord et le Nord-Ouest par la Marne et ses affluents (Ornain, Saulx, Rongean). Ces derniers, s'écoulant dans le sens du pendage des couches, entaillent profondément les Calcaires du Barrois. La dynamique de cette incision est intimement liée à la tectonique récente du secteur, ainsi qu'aux successions de périodes glaciaires et interglaciaires (Brulhet, 2005b). Ainsi, les périodes d'érosion les plus « efficaces » se positionnent en entrée des périodes froides glaciaires, à la faveur d'épisodes climatiques froids et humides, avec un gel marqué. Cet héritage explique la morphologie des vallées observées actuellement, surdimensionnées pour les cours d'eau, méandriques et divagant sur leurs plaines alluviales (Brulhet, 2005b ; Texier & Leclerc-Cessac, 2005). Les vallées sont inondées de manière saisonnière, durant les mois les plus pluvieux.

Les fonds de vallées sont les exhaures naturelles de la nappe des Calcaires du Barrois (cf. Figure 3.5.3). Ces dernières s'expriment sous forme de sources karstiques, aux débits fortement influencés par les précipitations, mais pouvant atteindre plusieurs  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  (Andra, 2005a, situation 17). Ces sources se rencontrent essentiellement lorsque la partie supérieure des Calcaires du Barrois est entaillée. Les karsts de la partie supérieure des Calcaires du Barrois sont également responsables de pertes pour certains cours d'eau (l'Orge en aval de Saudron et de Couvertpuis, la Saulx au Nord du secteur) (Brulhet, 2005b). Concernant la partie inférieure, où les karsts sont absents, les débits des rares sources sont très faibles (quelques dizaines de l/min au maximum) et intermittents.

Cette différence de comportement hydraulique des deux ensembles des Calcaires du Barrois se retrouve pour les ressources en eaux souterraines. Lorsque la partie inférieure (les trente premiers mètres de la formation) est à l'affleurement, comme c'est le cas sur le site du laboratoire souterrain, les

ressources en eau, trop faibles, ne sont pas ou peu exploitées : les débits en forages sont de l'ordre de 10 à 15 l.min<sup>-1</sup>, comme le montrent les mesures effectuées aux alentours du site (Andra, 2003c) et (Andra, 2005a, situation 17). En fonction des développements karstiques, ces productivités en forages peuvent, dans la partie supérieure, devenir très bonnes (jusqu'à 500 l.min<sup>-1</sup>) autorisant l'utilisation de la ressource pour les besoins des communautés humaines (sources de Rupt-aux-Nonains et de Cousances-les-Forges par exemple au nord du secteur (Andra, 2005a, situation 17).

Les intercalations de calcaires marneux au sein du Kimméridgien constituent également, à proximité de leurs affleurements, des ressources en eau. Les productivités en forages sont à 200 à 300 l.min<sup>-1</sup> dans les meilleurs cas. Les sources donnent des débits pouvant atteindre le m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> au maximum, mais avec des variations rapides, révélatrices des faibles réserves de ces aquifères (Andra, 2005a, situation 16). Sous couverture, la formation devient improductive (Andra, 2003b ; Trouiller & Benabderrahmane, 2005).

Les formations carbonatées encadrant le Callovo-Oxfordien (Oxfordien carbonaté et Dogger) sont improductives sur la site du laboratoire souterrain, du fait de leurs faibles perméabilités (cf. § 3.3.2.1 et 3.3.2.2). Les évaluations menées à partir des données des forages réalisés par l'Andra donnent des débits de quelques l.min<sup>-1</sup> (Andra, 2004b). Lorsqu'elles sont fracturées, comme c'est le cas par exemple au niveau du forage EST321 (cf. § 3.4.3), les débits peuvent être sensiblement plus importants : de quelques dizaines à une centaine de l.min<sup>-1</sup> (débits déterminés sur une courte période de tests et dont la pérennité n'est pas assurée) (Andra, 2004b).

À l'affleurement, ces formations sont productives, à l'image des Calcaires du Barrois, du fait de la karstification : elles sont alors susceptibles de fournir des débits importants (de l'ordre de plusieurs m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> voire plus). C'est le cas notamment de l'Oxfordien carbonaté dans la vallée de la Marne au Sud du secteur (Andra, 2005a, situation 15).

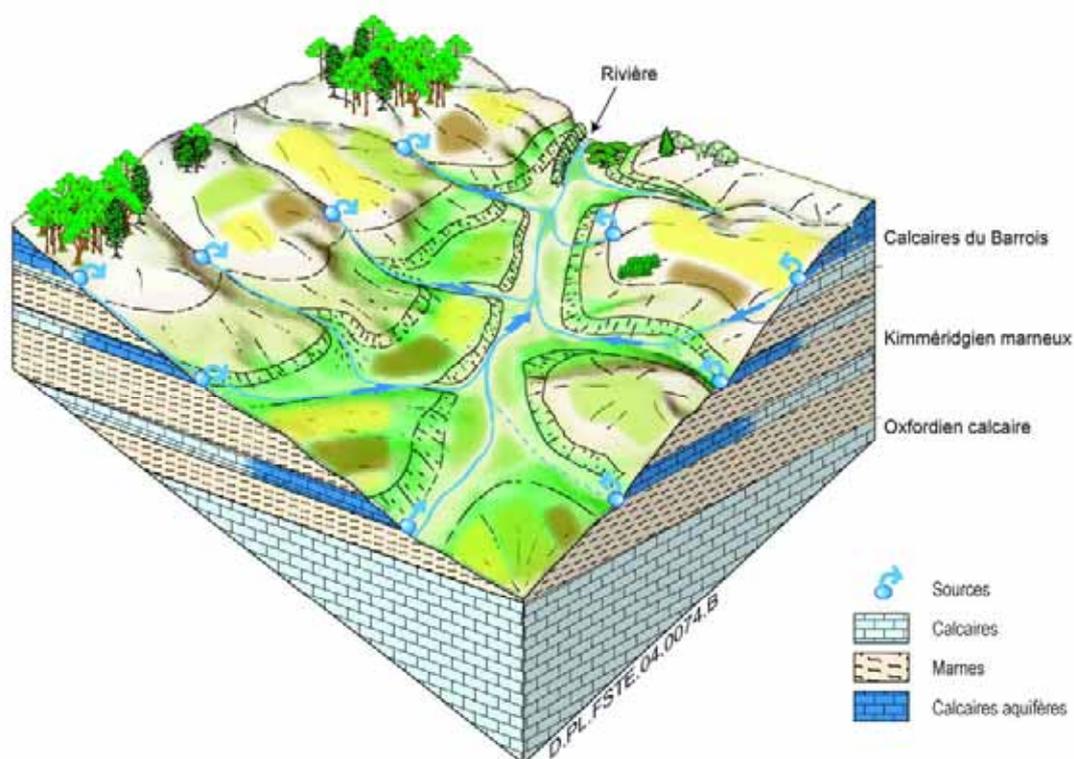


Figure 3.5.3 Représentation schématique des écoulements de surface sur le site de Meuse / Haute-Marne à l'actuel, et leur relation avec les unités lithologiques

### 3.5.4 Les sols

Les principaux types de sols se répartissent suivant la nature du substratum (calcaire ou argileux) et la situation géomorphologique considérées (thalweg, fonds de vallées) (Andra, 2005h, chapitre 22).

Sur les plateaux, les sols sont associés au substratum calcaire (Figure 3.5.4). Il s'agit dans la majorité des cas de rendzines peu épaisses, plus ou moins caillouteuses et limoneuses selon le modelé topographique (Texier & Leclerc-Cessac, 2005). Dans les thalwegs, ces sols sont à dominante limoneuse et peuvent montrer des épaisseurs importantes (jusqu'à 3 m) (Andra, 2005h, chapitre 22). Ces sols se maintiennent sur le long terme, d'un cycle climatique glaciaire-interglaciaire à l'autre, et n'évoluent, au gré de ces fluctuations climatiques, que dans le détail, du fait des processus de pédogenèse (dissolution du substratum), des dépôts et érosions éoliennes (loess – limons) et/ou des actions périglaciaires (cryoturbations, érosions périglaciaires) (Brulhet, 2005b).

Sur les versants, le développement des sols est conditionné par les conditions climatiques. En période glaciaire, les versants sont le lieu de processus d'érosion (éboulis actifs, glissements gravitaires) qui limitent l'installation de sols, en fonction toutefois de la morphologie de détail et de l'exposition. Durant les périodes interglaciaires, comme l'actuel, les sols se stabilisent avec l'installation d'un couvert végétal (Brulhet, 2005b). Les versants montrent donc des sols peu évolués, peu épais, caillouteux et carbonatés (Texier & Leclerc-Cessac, 2005) (Figure 3.5.4).

Dans les dépressions marneuses, les sols sont peu profonds, à dominante argileuse (Texier & Leclerc-Cessac, 2005).

Dans les fonds de vallées, les sols sont érodés, puis « néoformés » à chaque cycle climatique (cf. § 9.4.2). Les sols, profonds et peu évolués, s'installent sur les alluvions/colluvions à dominante calcaire. Ils montrent un caractère limoneux, avec des dépôts de crues (inondations saisonnières) (Texier & Leclerc-Cessac, 2005) (Figure 3.5.4). Ils sont localement hydromorphes, lorsque le cours des vallées est situé sur des marnes (parties amont de la Saulx, de l'Orge et du Rongéant notamment).

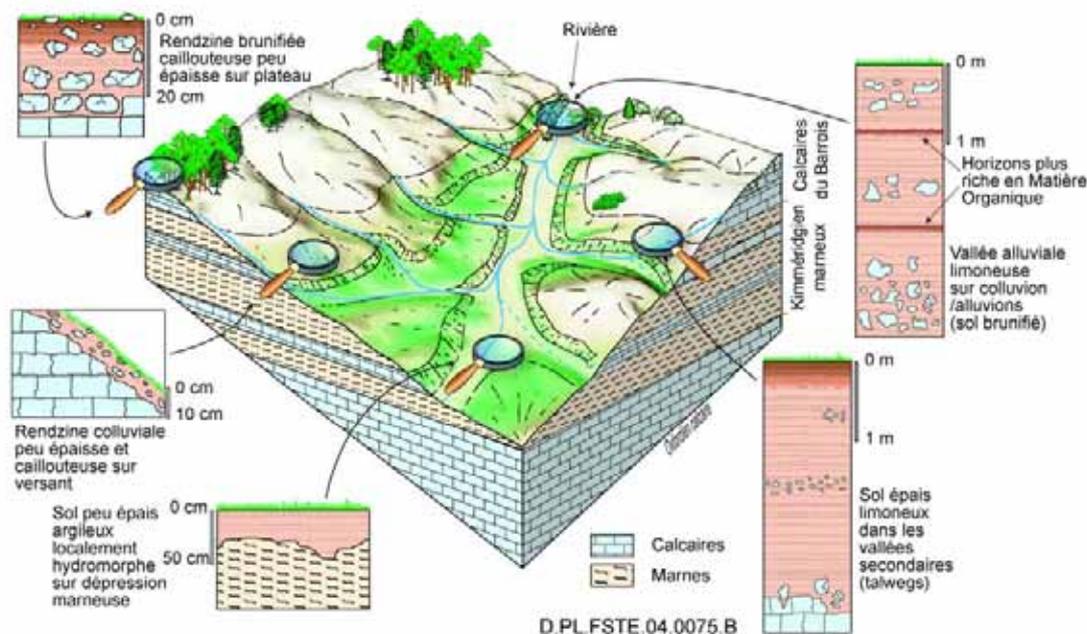


Figure 3.5.4 Répartition schématique des différents sols sur le site de Meuse / Haute-Marne à l'actuel

### 3.5.5 La flore et la faune

Le climat et les sols sont favorables à un fort potentiel végétal et à une bonne productivité des cultures (Texier & Leclerc-Cessac, 2005).

Sur les plateaux et les versants, les espaces agricoles remplacent progressivement, depuis les derniers millénaires, la forêt tempérée mixte (feuillus et conifères) qui, bien qu'existant encore sur de grandes surfaces (forêt de Montiers notamment), se présente le plus souvent sous forme de petits massifs boisés (Andra, 2005h, chapitre 22), (Figure 3.5.5).

Les fonds de vallées sont occupés par des prairies (humides ou non selon le sol) (Figure 3.5.5).

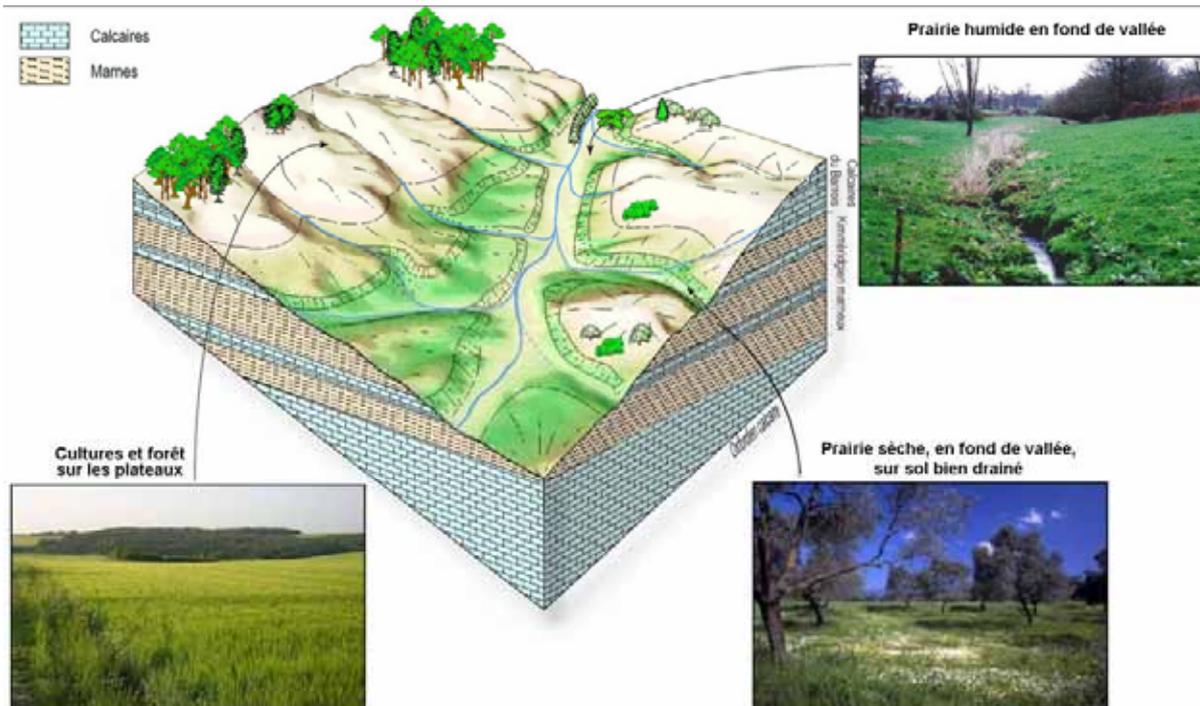


Figure 3.5.5 Répartition schématique des grands ensembles naturels sur le site de Meuse / Haute-Marne à l'actuel.

L'alternance et la diversité des milieux permettent le maintien et le développement d'une faune nombreuse et variée (oiseaux et mammifères, gibier notamment). Cette richesse faunistique est également entretenue par la bonne répartition des points d'eau et des zones humides sur l'ensemble du secteur. Ainsi, toutes les chaînes alimentaires sont particulièrement bien représentées, avec à leur sommet, une grande variété de prédateurs (carnivores) (Andra, 2005h, chapitre 22).

### 3.5.6 Les activités humaines

L'habitat est essentiellement regroupé dans les vallées, près des ressources en eau. Seules, quelques fermes sont isolées sur les plateaux. L'activité principale du secteur est l'agriculture, centrée sur la production de céréales et d'oléagineux et l'élevage bovin (Texier & Leclerc-Cessac, 2005).

### 3.6 Synthèse sur l'état initial du milieu géologique

Cette synthèse de l'état initial du milieu géologique vise à extraire de ce qui précède les éléments les plus importants permettant de fixer un cadre pour les chapitres suivants, qui vont décrire l'évolution de ce milieu sous l'influence d'un stockage et des processus géodynamiques.

#### 3.6.1 Sur le plan géologique : une structure simple et une couche du Callovo-Oxfordien homogène sur le secteur

Le milieu géologique montre une structure simple. Il se présente sous la forme d'un empilement de grands ensembles lithologiques contrastés (alternativement carbonatés et argileux), bien identifiables, de géométries planes, montrant peu de variations d'épaisseur, et continus à l'échelle de la zone de transposition et du secteur. Il s'inscrit parfaitement dans la géométrie générale des dépôts à l'échelle du Bassin de Paris.

Au sein de ces grands ensembles, le Callovo-Oxfordien est une couche à dominante argileuse d'une épaisseur variant de 130 m minimum à 160 m, située entre 500 et 630 m de profondeur sur la zone de transposition. Verticalement, la couche s'organise en 3 séquences sédimentaires, dont les limites sont soulignées par de minces dépôts carbonatés, corrélables sur de grandes distances. La partie centrale du Callovo-Oxfordien correspond à la zone la plus argileuse (jusqu'à 60 % de minéraux argileux). Le sommet de la couche (30 à 40 derniers mètres) est caractérisé par un enrichissement en carbonates. Sur la zone de transposition et au-delà, elle montre peu de variations latérales de lithologie.

Cette formation est encadrée par deux ensembles carbonatés massifs (Dogger et Oxfordien calcaires), non affleurants sur la zone de transposition. Les couches à l'affleurement sur la zone de transposition (Kimméridgien marneux dans les vallées et Calcaires du Barrois sur les plateaux), déterminent, par leur structure plane, leur pendage régulier et leurs différences de lithologie, un relief de côte caractéristique, les zones de plateaux étant entaillées par des vallées profondes.

L'ensemble est peu déformé. Le secteur est encadré par des failles qui ont absorbé les principales déformations tectoniques de l'histoire géologique. On distingue à l'Est, le fossé de Gondrecourt, à l'Ouest les failles de la Marne et au Sud-Ouest du site, une zone, associée à la faille de Poissons et au possible prolongement d'un ensemble de failles mineures reconnues en surface, dite zone de fracturation diffuse. Dans cette dernière, l'existence d'une microfracturation dans l'Oxfordien carbonaté, associée à des phénomènes de dissolution, a été reconnue en forage, mais ses limites, définies aujourd'hui de manière « enveloppe », restent à confirmer. Elle pourrait localement induire des écoulements plus rapides dans cette formation, sans perturber le fonctionnement hydrogéologique global et notamment le rôle de barrière joué par le Callovo-Oxfordien. Le cadre géométrique général très plan n'est perturbé qu'à proximité des failles majeures, de rejet maximum inférieur à la centaine de mètres. La zone de transposition est située à l'écart de ces accidents majeurs et de la zone de fracturation diffuse. Les investigations menées à ce jour n'ont pas mis en évidence dans cette zone de transposition de discontinuité d'origine tectonique détectable (c'est-à-dire avec un rejet vertical supérieur à 5 m, valeur pouvant être ramenée à 2 mètres sur le site même du laboratoire souterrain).

Les caractéristiques pétrophysiques des formations ont été acquises très tôt dans l'histoire géologique, soit dès leur dépôt ou juste postérieurement, soit lors de phases diagénétiques dont les plus récentes sont contemporaines de l'histoire tertiaire. Les propriétés texturales du Callovo-Oxfordien ont été acquises lors de l'histoire précoce de la formation. Celles-ci conditionnent sa faible perméabilité, homogène sur l'ensemble de la formation (de quelques  $10^{-13}$  à  $10^{-14}$  m.s<sup>-1</sup>). Les dernières phases diagénétiques sont responsables des faibles perméabilités observées dans les carbonates du Dogger et

de l'Oxfordien carbonaté, lorsqu'ils sont sous couverture, à l'échelle de l'auréole Est du bassin de Paris. Ces dernières phases sont à relier à la mise à l'affleurement des formations carbonatées, à l'Est du secteur, et à la circulation d'eau d'origine météorique. Elles n'affectent pas le Callovo-Oxfordien, plus imperméable. Le Callovo-Oxfordien et ses encaissants montrent ainsi une évolution très lente depuis plusieurs dizaines de millions d'années, de sorte que l'on peut dire que ces formations sont, en profondeur, à l'équilibre à ces échelles de temps.

### 3.6.2 Sur le plan thermique : un système géothermal exempt d'anomalie

Le secteur ne montre pas d'anomalie géothermale par rapport au reste du bassin de Paris : le gradient de température y est plus faible que la moyenne, de l'ordre de 2,3 °C/100 m, soit une température de l'ordre de 23 °C au milieu de la couche, à l'aplomb du laboratoire souterrain. Il est essentiellement contrôlé par le flux crustal naturel et les variations climatiques de surface. Ces dernières sont liées aux cycles climatiques passés et sont amorties en profondeur. Elles n'ont donc que peu d'effet sur le Callovo-Oxfordien. Les phases de maximum glaciaires ont permis l'installation d'un pergélisol en surface et une pénétration temporaire de l'isotherme 0 °C jusque dans l'Oxfordien carbonaté, au maximum. Les propriétés thermiques du Callovo-Oxfordien sont relativement homogènes sur l'épaisseur de la couche. Elles sont anisotropes du fait de la stratification (de 1,3 à 1,9 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> en vertical et de 1,9 à 2,7 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> en horizontal).

### 3.6.3 Sur le plan hydraulique : un Callovo-Oxfordien à faible perméabilité et des écoulements lents dans les encaissants

L'hydrogéologie actuelle du secteur résulte d'une lente évolution depuis plusieurs millions d'années, notamment sous l'effet de l'érosion des terrains en surface entraînant la migration des aires de recharge et la création de nouveaux exutoires au niveau des vallées. Au cours de cette évolution, l'installation de pergélisol lors des cycles glaciaires a créé des perturbations réversibles dans l'Oxfordien carbonaté, dont la durée de l'ordre de 20 000 ans par cycle de 100 000 ans, est brève à l'échelle de plusieurs millions d'années.

L'alternance verticale de couches carbonatées et de couches argileuses faiblement perméables limite les écoulements verticaux. Les différences de salinité des eaux entre le Dogger et l'Oxfordien carbonaté (voir ci-dessous) sont cohérentes avec les faibles perméabilités mesurées dans le Callovo-Oxfordien : de quelques 10<sup>-13</sup> à 10<sup>-14</sup> m.s<sup>-1</sup>. Ces valeurs basses, homogènes sur toute la hauteur de la couche, sont contrôlées par la texture des argilites et peuvent s'extrapoler, sur la base de la faible variabilité latérale de la couche, à l'ensemble de la zone de transposition. Elles déterminent des vitesses de circulation lentes au sein de la couche (Figure 3.6.1). Une surpression par rapport aux encaissants de l'ordre de la trentaine à quarantaine de mètres a été mesurée dans le Callovo-Oxfordien. L'amplitude de cette surpression n'est interprétable, en l'état actuel des connaissances, qu'en faisant intervenir un phénomène d'osmose. Elle n'affecte pas les écoulements dans le Callovo-Oxfordien. Ces derniers, essentiellement verticaux, sont contrôlés par le gradient de charge entre les deux encaissants carbonatés. Au sein de la zone de transposition, ce gradient est faible (de 0,2 m.m<sup>-1</sup> responsable d'un écoulement descendant au sud à 0,3 m.m<sup>-1</sup> responsable d'un écoulement ascendant au nord et nord-ouest). Dans les encaissants, les écoulements sont essentiellement horizontaux (Figure 3.6.1). En accord avec la structure générale de toute cette partie orientale du Bassin de Paris, ces écoulements sont dirigés globalement vers le centre du bassin, à l'Ouest. Pour une fraction des écoulements à partir du site, et uniquement pour l'Oxfordien carbonaté, un seul exutoire local existe, à l'Ouest du site, à la faveur de la vallée de la Marne qui entaille profondément les formations. Toutes les autres trajectoires, tant pour l'Oxfordien que pour le Dogger, montrent des directions régionales, vers le centre du bassin de Paris.

Les faibles perméabilités des calcaires du Dogger et de l'Oxfordien imposent sur le secteur des vitesses d'écoulements lentes, en moyenne de l'ordre du kilomètre par centaine de milliers d'années,

voire inférieures pour le Dogger. Les failles majeures sur le secteur n'ont pas de rôle hydraulique marqué dans ces circulations en profondeur, bien qu'à l'échelle du bassin de Paris, des échanges entre aquifères aient pu être mis en évidence au travers des failles régionales. Dans ces encaissements carbonatés, les débits en forage sont faibles, quelques litres par minute. Dans les zones fracturées, les débits en forage peuvent être plus élevés.

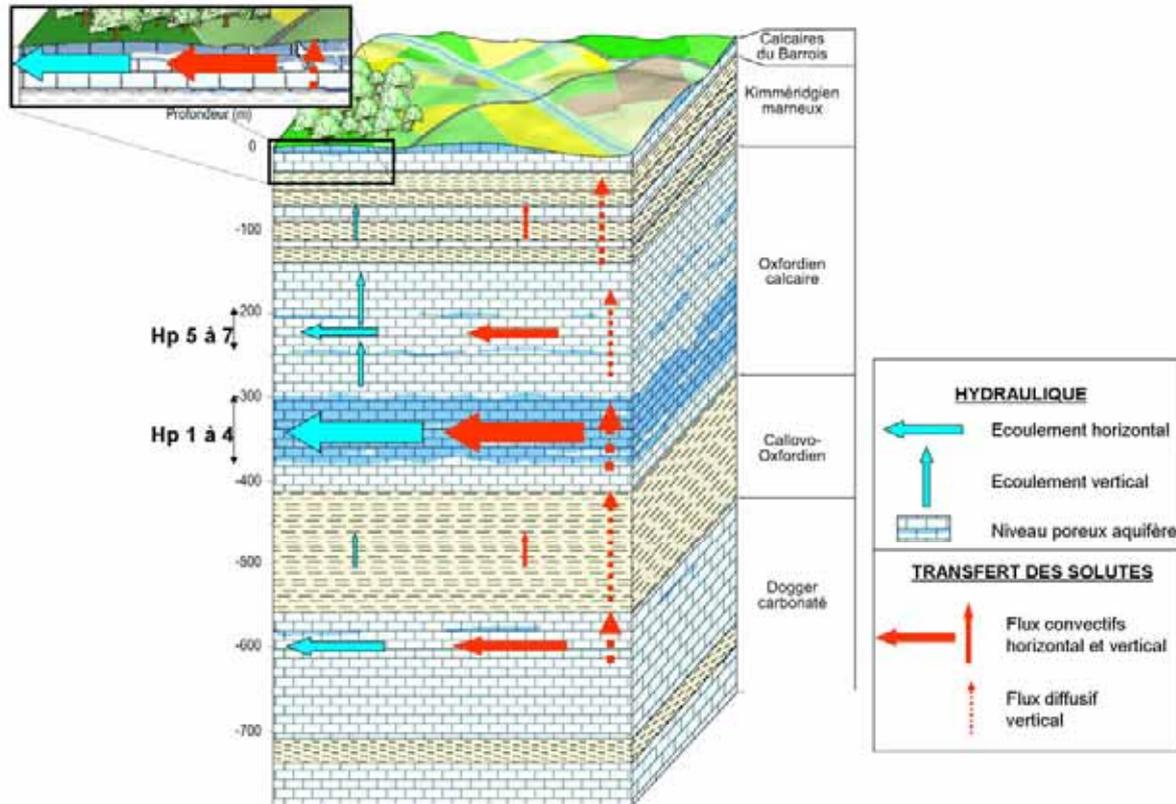


Figure 3.6.1 Représentation schématique des écoulements et du transport des solutés dans le milieu géologique à l'état initial

### 3.6.4 Sur le plan chimique : des formations homogènes avec des eaux à l'équilibre faiblement alcalines de type carbonatées, sodi-calciques et réductrices

Les lentes circulations d'eau, tant dans le Callovo-Oxfordien que dans les encaissements, imposent en profondeur, un état chimique proche de l'équilibre, avec des eaux de compositions globalement homogènes pour chaque formation. De manière générale, les eaux des formations sont réductrices, carbonatées et faiblement alcalines. Plus particulièrement, les eaux du Callovo-Oxfordien présentent des charges en chlorures et en sulfates. La composition chimique de l'eau est considérée homogène sur toute l'épaisseur de la formation ainsi que latéralement, en cohérence avec l'homogénéité lithologique globale de celle-ci et sa faible variabilité à l'échelle de la zone de transposition. Le Dogger montre des salinités totales élevées (jusqu'à des valeurs de l'ordre de  $4 \text{ g.L}^{-1}$ ) qui contrôlent les salinités du Callovo-Oxfordien. Au sein de ce dernier, la salinité décroissante vers le toit de la formation est caractéristique d'un milieu au sein duquel la diffusion est le phénomène de transport dominant. Dans l'Oxfordien carbonaté les salinités (moins de  $1 \text{ g.L}^{-1}$ ) sont inférieures à celles observées au toit de la couche, montrant la dilution par les flux horizontaux dans cet aquifère (Figure 3.6.1). D'une manière

générale, les différences très marquées de compositions chimiques et isotopiques des eaux du Dogger et de l'Oxfordien carbonaté illustrent le caractère imperméable en grand du Callovo-Oxfordien.

Les cycles climatiques passés n'ont pas modifié la chimie des eaux du Callovo-Oxfordien en profondeur, notamment du fait de sa capacité tampon. Les perturbations possibles ont pu être sensibles dans l'Oxfordien carbonaté, mais sur des durées limitées et sans effet chimique irréversible.

### **3.6.5 Sur le plan mécanique : un champ de contraintes naturelles simple et cohérent avec les connaissances à l'échelle du Bassin de Paris**

L'état actuel des contraintes mécaniques naturelles est acquis depuis plus de vingt millions d'années. La contrainte verticale correspond au poids des terrains. L'état de contrainte horizontale est légèrement anisotrope (avec un rapport d'anisotropie  $\sigma_H / \sigma_h$  de 1 à 1,2), la contrainte majeure étant orientée Nord-Nord-Ouest/Sud-Sud-Est. Cette direction se retrouve sur la totalité du bassin de Paris et résulte de la mise en compression, suite à la poussée alpine, de l'ensemble de la plaque ouest-européenne.

Les vitesses de déformation sont lentes et le secteur est éloigné des zones de déformation actuellement actives. Les vitesses de déplacements le long des plans de failles de socle du secteur sont estimées inférieures à  $10^{-6}$  m.an<sup>-1</sup>. Ceci explique le caractère sismiquement calme de cette partie du Bassin Parisien, corroboré par l'absence d'indices d'activité tectonique quaternaire sur les failles du secteur.

Le pourcentage d'argile conditionne le comportement mécanique intrinsèque de la couche du Callovo-Oxfordien qui peut être subdivisée en 3 zones, en fonction des variations de ce pourcentage. Ainsi, la zone médiane, plus riche en argiles et correspondant au niveau d'implantation du laboratoire, est plus déformable que les zones inférieure et supérieure, cette dernière montrant notamment un comportement plus raide du fait des intercalations carbonatées. La vitesse de fluage sur les premières semaines, estimée entre  $10^{-2}$  à  $10^{-3}$  an<sup>-1</sup> dans la partie centrale du Callovo-Oxfordien, est environ 4 fois plus faible dans la partie supérieure (zone « A »). Cette zone centrale montre une résistance à la compression de l'ordre de 20 MPa et un module de déformation de 4 500 MPa.

### **3.6.6 Sur le plan de l'environnement de surface : des caractéristiques héritées de l'histoire climatique et de l'évolution géomorphologique**

Pour les formations à l'affleurement (Kimméridgien, Calcaires du Barrois), les impacts des évolutions géodynamiques internes et externes ont été plus importants. Ainsi, les principales caractéristiques de ces formations et de la biosphère actuelle : répartition de la ressource en eau, pérennité (sur les plateaux) ou la néoformation (dans les vallées) des sols, répartition des différentes zones de cultures et boisées, etc. sont l'héritage des cycles climatiques passés et des évolutions de modelé géomorphologique général du secteur sur les derniers millions d'années.

# 4

## Les processus phénoménologiques

---

- 4.1 Les grands processus phénoménologiques liés au stockage .....173
- 4.2 Les grands processus phénoménologiques liés à l'évolution géodynamique .....175
- 4.3 Les échelles de temps des grands processus phénoménologiques et du relâchement et du transfert des radionucléides .....175
- 4.4 L'organisation spatiale de l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique : indépendance et similitude .....177



Les phénomènes mis en jeu dans l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique sont multiples. Cependant, il est possible de dégager un ensemble de processus majeurs, qui serviront de guide pour l'analyse et la description de l'évolution phénoménologique menées dans les chapitres qui suivent.

À partir de l'état d'équilibre observé actuellement, deux moteurs spécifiques sont responsables de l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique :

- le stockage lui-même,
- l'évolution géodynamique naturelle du milieu géologique : évolution climatique en surface et géodynamique interne (mouvements tectoniques).

## 4.1 Les grands processus phénoménologiques liés au stockage

Au regard des caractéristiques du milieu géologique à l'équilibre telles que décrites dans le chapitre 3 et des caractéristiques du stockage telles que décrites dans le chapitre 2, le stockage constitue une source de sollicitations de natures diverses (THMC) agissant sur le stockage lui-même et sur le milieu géologique environnant (*i.e.* la couche du Callovo-Oxfordien et, de façon marginale, les formations géologiques encaissantes).

### 4.1.1 La charge thermique des déchets exothermiques

La mise en place des colis de déchets C et des colis de combustibles usés dans le stockage, et dans une moindre mesure celle des déchets B peu exothermiques, (cf. § 2.3.3) entraînent une élévation de température progressive au sein des zones de stockage correspondantes et dans le milieu géologique qui les environnent (principalement la couche du Callovo-Oxfordien). Du fait de la décroissance de la chaleur émise par les colis de déchets, cette élévation de température est transitoire : elle passe par un maximum, puis décroît jusqu'à ce que le stockage et le milieu géologique environnant retrouvent des températures géothermales naturelles.

### 4.1.2 Les processus hydrauliques : la décharge hydraulique, la désaturation, la resaturation couplée à la production d'hydrogène, et le retour à un nouvel équilibre hydraulique

Les formations géologiques sont initialement saturées et dans un état d'équilibre hydraulique, comme décrit dans le chapitre 3. Le stockage crée un ensemble de sollicitations hydrauliques étagées dans le temps qui peuvent être regroupées comme suit :

- En premier lieu, la création du stockage entraîne une décharge hydraulique instantanée (*i.e.* une chute des pressions d'eau) dans chacune des formations sus-jacentes au Callovo-Oxfordien autour des puits d'accès, et dans la couche du Callovo-Oxfordien autour de l'ensemble des ouvrages (galeries, alvéoles de stockage et puits d'accès). La décharge hydraulique se propage pendant la phase d'exploitation autour des ouvrages maintenus ouverts. Dans les ouvrages ventilés, la ventilation avec un air non saturé d'eau provoque une désaturation des argilites au voisinage immédiat de ces ouvrages, qui s'ajoute à la décharge hydraulique.
- La fermeture progressive des ouvrages, notamment des galeries, jusqu'à celle complète du stockage emprisonne de l'air. Les processus de décharge hydraulique et de désaturation s'arrêtent et la resaturation du stockage et de la zone d'argilites éventuellement désaturées lors de l'exploitation du stockage débute. Cette resaturation est influencée par l'hydrogène issu de la corrosion des composants métalliques du stockage, notamment dans les alvéoles de déchets C et de combustibles usés. Après atteinte de la saturation totale, un nouvel état d'équilibre hydraulique se met en place *in fine* au sein du stockage et du Callovo-Oxfordien autour des zones de stockage.

#### 4.1.3 Les processus chimiques : des réactions d'interface au niveau des argilites en champ proche et des composants argileux, la corrosion des composants métalliques et la dégradation chimique des bétons

Les dispositions de conception du stockage visent à limiter autant que possible les sollicitations chimiques au sein du stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien. Le stockage n'en constitue pas moins une source intrinsèque de sollicitations chimiques. Elles sont en outre influencées par la charge thermique et les processus hydrauliques évoqués ci-dessus. Ces sollicitations chimiques résultent pour l'essentiel de l'introduction de matériaux et de fluides exogènes à la couche du Callovo-Oxfordien. Ces matériaux et ces fluides sont :

- soit hors équilibre avec la chimie des eaux et des solides de la couche du Callovo-Oxfordien ; c'est par exemple le cas des bétons des alvéoles de déchets B, ou de l'oxygène de l'air de ventilation,
- soit proche de l'équilibre avec la couche du Callovo-Oxfordien, comme par exemple les argiles gonflantes de scellements et de bouchons d'alvéole de stockage ou les argilites excavées remaniées des remblais de galeries.

Hormis les conséquences chimiques indirectes liées à la charge thermique qui affecte le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien dans leur ensemble, les sollicitations chimiques sont pour l'essentiel localisées aux interfaces, du fait notamment des lents transferts de solutés dans et autour du stockage. Il s'agit principalement :

- ***pour le stockage*** : de la dégradation chimique des composants artificiels : la dégradation aqueuse des bétons au contact des eaux des argilites, la corrosion des métaux (conteneurage et déchets), l'altération des argiles gonflantes au contact du fer et des bétons ou l'altération des argilites remaniées de remblais, la corrosion aqueuse du verre et la dissolution aqueuse des matrices d'oxydes des combustibles usés ;
- ***pour la couche du Callovo-Oxfordien*** : la perturbation oxydante liée à la présence de l'air de ventilation combinée à la désaturation autour des ouvrages ventilés, la perturbation alcaline au contact des composants du stockage en béton (alvéole de déchets B et galeries) et la perturbation créée par le fer au contact des composants métalliques (chemisage des alvéoles de déchets C - soutènement et chemisage des alvéoles de combustibles usés).

#### 4.1.4 Les processus mécaniques de décharge et d'endommagement dans la couche du Callovo-Oxfordien autour du stockage, puis le rééquilibrage mécanique

La réalisation des ouvrages entraîne une décharge mécanique instantanée des argilites autour des ouvrages, caractérisée par l'apparition d'une zone de roche perturbée à leur paroi, appelée EDZ (« Excavation Damaged Zone »). Le comportement mécanique du stockage en général, et de l'EDZ en particulier, ainsi que celui du Callovo-Oxfordien en champ proche, évoluent ensuite pendant la période d'exploitation, puis en postfermeture sous l'effet de la charge thermique, de processus hydrauliques comme la désaturation puis la resaturation, et des processus chimiques.

Sur le long terme, le fluage des argilites et la dégradation chimique progressive des composants du stockage, comme par exemple la corrosion des conteneurages ou l'attaque chimique des bétons par les eaux des argilites, sont à l'origine de l'évolution mécanique du stockage et *in fine* d'un nouvel état d'équilibre mécanique à l'échelle du stockage, proche de l'état actuel.

## **4.2 Les grands processus phénoménologiques liés à l'évolution géodynamique**

### **4.2.1 La géodynamique interne**

Le site de Meuse / Haute-Marne présente une très grande stabilité vis-à-vis des phénomènes géodynamiques internes. Les mouvements d'isostasie sont très faibles. Les changements climatiques constituent donc le principal moteur de l'évolution géodynamique sur le prochain million d'années et au-delà.

### **4.2.2 Les changements climatiques**

À partir de l'extrapolation des seules données du passé ou en combinant ces données avec les perturbations humaines, notamment l'émission massive de gaz à effet de serre, la théorie astronomique des climats conduit à envisager sur le site de Meuse / Haute-Marne :

- ✓ soit une poursuite des cycles climatiques quaternaires, à savoir l'alternance de cycles glaciaire–interglaciaire avec des fréquences de l'ordre de 100 000 ans,
- ✓ soit une période de réchauffement d'une durée d'environ plusieurs dizaines de milliers d'années, puis un retour aux cycles climatiques naturels vers 500 000 ans.

Ces changements climatiques sont à l'origine d'une érosion qui n'atteint pas la couche du Callovo-Oxfordien, mais modifient localement la morphologie des terrains de surface : approfondissement des vallées combiné à un recul des lignes de côtes et à un lent déplacement des aires d'affleurement des différentes formations géologiques, développement de nouveaux systèmes karstiques et des phénomènes de captures de rivières. Sur le million d'années, ces changements de morphologie modifient les écoulements des eaux, et donc le transport des solutés, dans les formations géologiques encaissantes, notamment celles sus-jacentes. Néanmoins, le transport des solutés dans la couche du Callovo-Oxfordien sur la zone de transposition n'est pas affecté, et reste toujours diffusif dominant comme c'est le cas à l'état actuel (cf. § 3).

## **4.3 Les échelles de temps des grands processus phénoménologiques et du relâchement et du transfert des radionucléides**

Les processus THMCR majeurs décrits précédemment se développent sur des périodes de temps qui leur sont propres, comme schématisé sur la Figure 4.3.1, bien qu'à terme (quelques dizaines de milliers à une centaine de milliers d'années), ces processus tendent vers un nouvel état d'équilibre ou une évolution très lente.

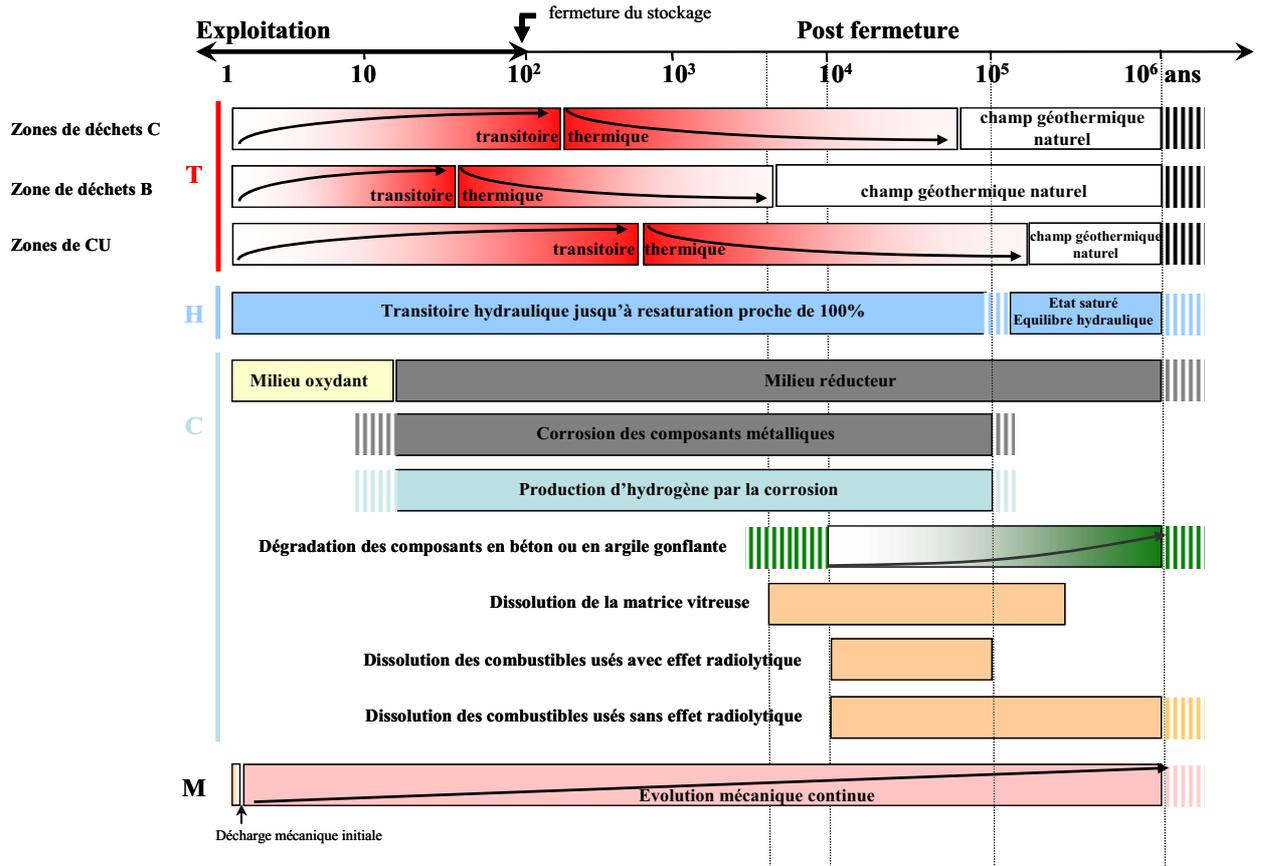


Figure 4.3.1 Chronogramme des phénomènes majeurs affectant le stockage et son environnement géologique (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage)

On retiendra globalement que :

- les processus géodynamiques s'inscrivent sur une échelle de temps couvrant le million d'années et au-delà ;
- la charge thermique concerne une échelle de temps de plusieurs dizaines de milliers d'années, mais les paroxysmes sont atteints dans le stockage en quelques dizaines d'années ou quelques centaines d'années ;
- les processus hydrauliques dans le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien s'inscrivent sur une échelle de temps de 100 000 ans environ, avant l'atteinte de la saturation totale du stockage vers 200 000 ans environ et le retour à un nouvel état d'équilibre hydraulique à l'échelle du stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien environnante ;
- hormis le transitoire redox qui apparaît comme un phénomène éphémère à l'échelle du million d'années, les processus chimiques se développent pour l'essentiel au-delà de la dizaine de milliers d'années sur quelques centaines de milliers d'années, voire le million d'années. Plus particulièrement, la corrosion des composants métalliques, notamment celle des conteneurs de déchets C et de combustibles usés, s'inscrit sur une période pouvant s'étendre de quelques milliers d'années à quelques dizaines de milliers d'années ;
- les processus mécaniques, qui dépendent pour une grande part des processus hydrauliques et de dégradation chimique des composants du stockage, s'étendent en premier lieu sur des échelles de temps comparables à celles de ces processus. Cependant, ils se développent naturellement sur le million d'années *a minima* du fait du fluage naturel très lent des argilites ;

- le relâchement des radionucléides dépend pour une grande part des processus chimiques, comme la corrosion des conteneurs métalliques, la dissolution aqueuse des matrices de conditionnement (par exemple le verre des déchets vitrifiés) ou la dissolution des pastilles d'oxydes des combustibles usés. Il s'inscrit donc sur une échelle de temps de quelques dizaines de milliers d'années à plusieurs centaines de milliers d'années *a minima*. Une fois relâchés, les radionucléides migrent dans la couche du Callovo-Oxfordien sur plusieurs centaines de milliers d'années, à l'image du transfert des solutés au sens large, exposé dans le chapitre 3.

#### **4.4 L'organisation spatiale de l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique : indépendance et similitude**

(i) Le principe de fractionnement et de modularité du stockage, (ii) la forte épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien assurant une garde minimale de 60 mètres entre le stockage et les encaissants, (iii) les propriétés spécifiques du Callovo-Oxfordien comme sa faible perméabilité et sa capacité tampon chimique élevée, et (iv) la présence des scellements et des bouchons d'alvéoles de stockage, qui « ferment » hydrauliquement le stockage, ont pour conséquence de limiter ou d'empêcher une organisation spatiale complexe de l'évolution phénoménologique du stockage et de son encaissant géologique.

Ainsi :

- les distances de plusieurs centaines de mètres entre les zones de stockage sont supérieures, voire très supérieures, aux extensions des processus majeurs décrits précédemment : thermique (pluridécimétrique), mécanique (plurimétrique), chimique (métrique à plurimétrique) et hydraulique (plurimétrique à pluridécimétrique) (Encadré 4.1). Elles imposent donc des évolutions phénoménologiques (quasi)indépendantes des zones de stockage et de leur Callovo-Oxfordien environnant ;
- à l'intérieur d'une zone de stockage, les modules adjacents sont distants de quelques dizaines de mètres. Comme pour les zones de stockage, les modules autres que ceux qui sont adjacents sont suffisamment éloignés les uns des autres pour ne pas avoir d'interaction phénoménologique. De ce fait, l'ensemble des modules présente des évolutions phénoménologiques identiques. Un tel schéma se reproduit pour les alvéoles de stockage à l'intérieur d'un module.

Les alvéoles et les modules de stockage constituent donc autant de motifs phénoménologiques élémentaires qui se répètent dans l'espace pour constituer ensemble l'évolution phénoménologique globale d'une zone de stockage et de la portion de Callovo-Oxfordien environnant.

**Encadré 4.1 Les interactions phénoménologiques dans la couche du Callovo-Oxfordien : Estimation des temps et des distances caractéristiques d'interactions thermique, hydraulique et chimique**

De manière générale, les transferts de chaleur et de solutés, ainsi que la propagation des variations de pression hydraulique dans un milieu poreux comme la couche du Callovo-Oxfordien sont de types diffusif. Ils sont alors caractérisés par un coefficient dit de diffusion exprimé en  $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ . Ce coefficient traduit l'aptitude du milieu poreux à transférer une quantité de chaleur, de pression ou de soluté créée par une source. À titre d'exemple, la diffusivité thermique est le rapport de la conductivité thermique, qui traduit l'aptitude du milieu à transférer de la chaleur par conduction, sur la capacité calorifique, qui traduit l'aptitude du milieu à accumuler de la chaleur. Plus le coefficient de diffusion est petit, plus le transfert de la grandeur considérée est lent.

Les ordres de grandeur des coefficients de diffusion de la couche du Callovo-Oxfordien sont donnés dans le tableau suivant :

Diffusivité thermique	Diffusivité hydraulique	Diffusivité apparente des solutés
$10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	$10^{-8} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	$10^{-10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$

Classiquement, on estime :

- la **distance caractéristique**  $L_c$  à partir de laquelle une source constante de chaleur, de pression ou de soluté se fait sentir au bout d'un temps  $t_c$ ,
- et inversement le **temps caractéristique**  $t_c$  nécessaire pour que cette source constante se fasse sentir à une distance  $L_c$

à partir de la formule suivante  $t_c = \frac{L_c^2}{2D}$  où D est le coefficient de diffusion.

Appliquée au transfert de la chaleur par exemple, cette formule correspond au cas d'un milieu infini initialement à température constante (par exemple  $0^\circ\text{C}$ ) et dans lequel se trouve une source plane infinie. À l'instant  $t = 0$ , cette source est supposée être portée à une température T différente de la température initiale, puis maintenue à cette température. Sous l'effet de la source plane, le milieu augmente progressivement de température pour atteindre partout *in fine* la température T. La formule ci-dessus donne le temps pour qu'un point situé à une distance L de la source plane atteigne une température T/2.

On notera que :

- cette formule n'est pas linéaire : le temps caractéristique croît comme le carré de la distance à la source, soulignant ainsi le fait que plus l'on s'éloigne de la source, plus les durées d'interaction croissent, et ce de manière exponentielle ;
- le temps caractéristique varie linéairement avec le coefficient de diffusion. Si l'on compare les valeurs des différents coefficients de diffusion indiquées dans le tableau ci-dessus, il apparaît clairement que le transfert de chaleur est le processus de transfert le plus rapide. Les temps caractéristiques hydrauliques et de transport des solutés sont respectivement deux à quatre ordres de grandeur supérieurs au temps caractéristique thermique, soulignant les propriétés de barrière hydraulique et de barrière de diffusion des solutés de la couche du Callovo-Oxfordien.

Dans le cadre du stockage, les sources peuvent être :

- Pour la chaleur : le dégagement thermique des colis de déchets.
- Pour la pression : la décharge hydraulique avec la réalisation des ouvrages ou la surpression liée à la dilatation thermique de l'eau lors du dégagement de chaleur des colis de déchet.
- Pour les solutés : le relâchement des radionucléides par les colis de déchets ou les eaux cimentaires issues des ouvrages en béton.

Ces sources ne sont pas constantes dans le temps : **i)** les puissances thermiques des colis décroissent dans le temps, **ii)** la décharge hydraulique liée à la création du stockage est limitée par la période d'exploitation d'ordre séculaire à pluriséculaire, et **iii)** les sources de radionucléides et de solutés s'épuisent *de facto*, soit par décroissance radioactive et relâchement progressif par les colis pour les premiers, soit parce que les masses des matériaux du stockage sont finies pour les seconds.

En outre, la couche du Callovo-Oxfordien n'est pas un milieu infini. Ainsi, vis-à-vis du transfert des radionucléides relâchés par le stockage, les formations encaissantes sus-jacentes et sous-jacentes constituent des conditions aux limites à concentration nulle, de sorte que les temps de transfert donnés par la formule de la source plane dans un milieu infini sont supérieurs à ceux depuis le stockage vers ces encaissants. C'est aussi le cas pour la décharge hydraulique autour du stockage, les encaissants constituant des conditions aux limites de charge hydraulique. Néanmoins, la formule d'une source plane dans un milieu infini permet d'estimer les distances d'interactions mises en jeu, comme indiqué dans le tableau ci-dessous (pour tenir compte de l'épaisseur finie de la couche du Callovo-Oxfordien, on s'est limité à un temps de 100 000 ans et on a indiqué le terme « sans objet » lorsque la combinaison temps – espace n'avait pas de sens).

Distance caractéristique théorique (cas d'une source plane dans un milieu infini)	1 an	10 ans	100 ans	1 000 ans	10 000 ans	100 000 ans
<b>Transfert de chaleur</b>	7,7 m	24 m	77 m	245 m	Sans objet	Sans objet
<b>Transfert de pression d'eau</b>	0,77 m	0,24 m	7,7 m	Sans objet	Sans objet	Sans objet
<b>Transfert de soluté</b>	0,07 m	0,24 m	0,77 m	2,45 m	7,74 m	24 m

On observe ainsi que :

- le transfert de la chaleur est rapide, mais 100 ans à 1 000 ans sont nécessaires pour qu'une source de chaleur entraîne une élévation de température supérieure à quelques degrés entre 100 mètres et 250 mètres environ. Or pendant ces durées, la puissance thermique des colis de déchets a fortement décru de sorte que même aux distances caractéristiques correspondantes l'influence thermique des colis est faible ;
- il en va de même pour la pression d'eau si le stockage n'est ouvert que sur une durée d'ordre séculaire. Dans ce cas, la décharge hydraulique n'est pas ressentie au-delà de quelques mètres autour des ouvrages ;
- le transfert de soluté est encore plus lent. Schématiquement, il faut plus d'un million d'années pour qu'un soluté parcourt, par diffusion, une distance d'au moins 80 mètres. Si l'on prend l'exemple des alvéoles de stockage de déchets B en béton, leur éloignement de plus de 250 mètres des zones de stockage de déchets C et de combustibles usés évite donc toute interaction des fluides cimentaires avec ces zones, et cela sans prendre en compte le fort effet de tampon chimique du Callovo-Oxfordien qui amortit plus encore le transfert de fluides cimentaires.



# 5

## La charge thermique

---

<b>5.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>183</b>
<b>5.2</b>	<b>Les modes de transfert de la chaleur émise par les colis de déchets dans le stockage et dans les formations géologiques environnantes .....</b>	<b>183</b>
<b>5.3</b>	<b>L'organisation spatiale de la charge thermique.....</b>	<b>187</b>
<b>5.4</b>	<b>Les charges thermiques des zones de stockage de déchets C et de combustibles usés .....</b>	<b>190</b>
<b>5.5</b>	<b>La charge thermique de la zone de stockage de déchets B.....</b>	<b>195</b>
<b>5.6</b>	<b>Synthèse sur la charge thermique du stockage .....</b>	<b>199</b>



## 5.1 Introduction

Dès la mise en place des colis de déchets C et des colis de combustibles usés dans les alvéoles de stockage, leur dégagement de chaleur déclenche une élévation de température progressive et transitoire dans les zones de stockage correspondantes et dans le milieu géologique environnant, appelée « charge thermique » (cf. § 2.3.4.6 – (Andra, 2005e)). Pour les colis de déchets B, ce phénomène affecte uniquement les alvéoles contenant des colis types B1 et B5 qui présentent une faible exothermicité et par conséquent une charge thermique plus limitée.

La charge thermique n'est pas ou peu influencée par l'ensemble des processus hydrauliques, chimiques ou mécaniques, qui affectent le stockage pendant la même période. En revanche, elle affecte l'ensemble de ces processus. De ce fait, la charge thermique est une donnée importante des évolutions hydraulique, chimique, mécanique, et *in fine* du relâchement et de la migration des radionucléides.

Afin de décrire la charge thermique dans ce chapitre, on rappelle dans un premier temps les modes de transfert de la chaleur dans le stockage et dans les formations géologiques. Puis, on décrit l'organisation temps / espace de la charge thermique de manière générale au niveau du stockage « en grand » et du milieu géologique. Enfin, les charges thermiques des différentes zones de stockage sont décrites en détail, de l'échelle de l'alvéole à celles de la zone de stockage et des formations géologiques environnantes.

La description de la charge thermique s'appuie principalement sur des travaux de modélisation numérique (par éléments finis), qui permettent de rendre compte des différentes échelles de temps et d'espace (Encadré 5.1). Les outils informatiques actuels permettent de réaliser des calculs numériques fiables concernant les évolutions de la température, grâce notamment à des maillages précis et des définitions de pas de temps adéquats. À titre d'exemple, les évaluations des évolutions de la température par des modélisations numériques, effectuées dans le cadre de la préparation de différentes expérimentations de chauffage en laboratoire de recherche souterrain, telles que FEBEX au Grimsel (Suisse) (Rutqvist & Tsang, 2003) et HE-D (Kull *et al.*, 2005) au Mont Terri, sont conformes aux mesures réalisées *in situ*.

## 5.2 Les modes de transfert de la chaleur émise par les colis de déchets dans le stockage et dans les formations géologiques environnantes

De manière globale, la propagation de la chaleur émise par les colis de déchets exothermiques dans les différents composants du stockage, dans la couche du Callovo-Oxfordien et dans les formations géologiques sous-jacentes et sus-jacentes vers la surface se fait principalement par conduction (Encadré 5.2).

### 5.2.1 Dans le milieu géologique

Compte tenu de la très faible perméabilité des argilites du Callovo-Oxfordien, la part de chaleur transportée par convection avec l'écoulement de l'eau interstitielle (naturel ou perturbé par le stockage) est faible. De même, la faible perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien et les gradients thermiques limités par le critère de température maximale admissible de 90 °C dans les argilites (Encadré 2.5, (Andra, 2005n)) ne permettent pas (ou peu) un transport de la chaleur par thermoconvection (Coelho, 2005).

Les perméabilités des formations géologiques encaissantes sont plus élevées que celle des argilites du Callovo-Oxfordien, mais les gradients thermiques créés par le stockage en champ lointain sont faibles

(inférieurs au degré Celsius par mètre) et s'atténuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du stockage, de sorte que le transfert de chaleur dans ces formations s'effectue par conduction (Encadré 5.2). Ainsi, sur le site de Meuse / Haute-Marne, la conduction constitue le principal mode de transfert de la chaleur. Cette analyse, également retenue par la Nagra pour le site argileux du « Weinland zurichois » dans le Nord de la Suisse (Johnson *et al.*, 2002) est applicable à tout site de stockage en formation d'argiles peu perméables sous couverture sédimentaire.

### *Encadré 5.1 Les méthodes d'évaluation de la charge thermique du stockage*

Le stockage représente une somme de sources thermiques, les colis de déchets, répartis dans l'espace : depuis l'échelle de l'alvéole jusqu'à l'échelle de la zone de stockage. À cette diversité des échelles d'espace, s'ajoute la diversité des composants dans lesquels se propage la chaleur : ceux du stockage et l'ensemble des formations géologiques du site. Enfin, compte tenu de la décroissance du dégagement thermique des colis de déchets, les temps d'atteinte des maxima d'élévation de température et les valeurs de ces maxima varient selon l'endroit considéré (par exemple au sein d'une alvéole de stockage, au centre d'un module ou d'une zone de stockage, dans la couche du Callovo-Oxfordien ou dans les formations encaissantes au droit de la zone de stockage) : pour les temps, de l'année à la centaine d'années ou aux milliers d'années, pour les élévations de température, de zéro à quelques dizaines de degrés Celsius.

De fait, l'évaluation de la charge thermique nécessite le recours à la modélisation numérique (calculs par éléments finis en 2 ou 3 dimensions) (Bauer, 2005). Elle est ainsi réalisée :

- en adoptant des simplifications géométriques d'homogénéisation de tout ou partie du stockage ;
- en modélisant les modes de transfert thermique de conduction dans tous les matériaux du modèle, de rayonnement entre toutes les parties séparées par de l'air (jeux fonctionnels, ...) lorsque celles-ci sont représentées. L'évolution temporelle des jeux et les variations de la conductivité thermique des composants du stockage en fonction du degré de saturation (comme les barrières ouvragées en argile gonflante) sont prises en compte.

Compte tenu du rapport élevé entre les dimensions caractéristiques des composants des alvéoles (e.g. le centimètre pour les jeux fonctionnels ou le chemisage) et de la zone thermiquement influencée par le stockage (quelques dizaines à quelques centaines de mètres), l'approche utilisée est une décomposition en modèles à différentes échelles, chacun possédant son domaine de validité :

- le **modèle local** à l'échelle de l'alvéole permet d'évaluer l'historique des températures dans une alvéole et dans son champ proche. L'alvéole est représentée dans le détail et on peut utiliser une phénoménologie complexe comme le couplage entre le transfert de la chaleur et la saturation ;
- le **modèle médian** à l'échelle du module de stockage inclut les ouvrages environnants de l'alvéole (galeries d'accès, scellements, ...) et permet d'évaluer la charge thermique à l'échelle d'un module. Il nécessite une représentation moins détaillée des alvéoles et une phénoménologie du transfert de chaleur limitée à la conduction pure sans couplage avec l'hydraulique ;
- le **modèle global** à l'échelle du site renseigne sur les températures atteintes dans les différentes formations géologiques en tenant compte de leurs caractéristiques thermiques. Il est bâti sur une représentation très simplifiée du stockage, généralement une source de chaleur volumique homogénéisée. Comme pour le modèle médian, seul le transfert de la chaleur par conduction pure non couplée à d'autres processus est retenu.

L'ensemble de ces modèles conduit à des incertitudes sur les évaluations des élévations de température, qui sont estimées à quelques degrés au maximum.

### Encadré 5.2 Les modes de transfert de la chaleur

Il existe trois principaux modes de transport de la chaleur, la conduction, la convection et le rayonnement :

- la **conduction** correspond à la transmission de la chaleur par la vibration des atomes de proche en proche dans toutes les directions de l'espace ;
- le **rayonnement** est la propagation de la chaleur sous forme de vibrations électromagnétiques (photons animés de vibration) qui se déplacent en ligne droite sans transport de matière ;
- la **convection** correspond au transfert de la chaleur par le transfert de matière, généralement des liquides et des gaz.

Dans les milieux géologiques, et les milieux poreux naturels en général, la conduction et la convection sont les modes de transfert de la chaleur principaux. La convection s'observe dans des formations aquifères puissantes où les débits d'eau peuvent entraîner la chaleur géothermale émise par le noyau de la Terre. Dans la plupart des formations géologiques, l'écoulement de l'eau est trop lent pour qu'il puisse entraîner une quantité de chaleur significative et la conduction est le mode de transfert dominant de la chaleur.

Concernant le rayonnement, tout corps solide émet un rayonnement thermique. Toutefois, le transfert par rayonnement entre deux corps n'est significatif que lorsqu'il existe un jeu d'air d'épaisseur significative entre eux et lorsque leurs émissivités sont importantes. Cela concerne donc peu ou pas les milieux naturels et les concepts de stockage pour lesquels on cherche à minimiser autant que possible les jeux.

#### La loi de Fourier

La conduction dans un milieu donné est décrite par la loi de Fourier reliant linéairement le flux de chaleur  $\phi$  transmis au gradient de température  $\text{grad}(T)$  appliqué à ce milieu :  $\phi = -\lambda \cdot \text{grad}(T)$  où  $\lambda$  est la conductivité thermique du milieu ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ).

Le rapport entre la conductivité thermique ( $\lambda$ ) et la capacité calorifique massique du milieu ( $\rho C_p$ ) est la diffusivité thermique ( $D_{\text{thermique}}$ ) :

$$D_{\text{thermique}} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$$

avec  $\rho$  la masse volumique ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) et  $C_p$  la chaleur spécifique ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ).

Physiquement, la diffusivité thermique ( $D_{\text{thermique}}$ ) représente la capacité du milieu à évacuer la chaleur par rapport à sa capacité à l'accumuler. En transitoire, plus  $D_{\text{thermique}}$  est grand, moins le milieu soumis à un flux de chaleur s'échauffe, et inversement plus  $D_{\text{thermique}}$  est petit, plus l'élévation de température du milieu est grande. Alors que les milieux naturels ont généralement des diffusivités thermiques similaires, environ  $10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , leurs conductivités thermiques peuvent être très différentes (de l'ordre de  $6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$  pour un sel et de  $1$  à  $2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$  pour les argilites).

## 5.2.2 Dans le stockage

Les ouvrages de stockage comportent différents matériaux, qui sont pour l'essentiel mis en place à l'état non saturé (comme la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés, les bétons après prise ou les remblais de galeries), ainsi que des jeux fonctionnels. En outre, les galeries et les alvéoles de déchets B sont soumises à une ventilation lors de la phase d'exploitation. Ces dispositions créent des conditions qui peuvent influencer localement le transfert de la chaleur au sein des ouvrages.

### 5.2.2.1 L'effet des jeux de mise en place

Les jeux de mise en place et les vides résiduels au sein des alvéoles de stockage permettent un transfert par rayonnement et par convection naturelle. Par conception, ceux-ci sont minimisés. Leur épaisseur dans les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés est au maximum de quelques centimètres. De fait, leur effet de couches thermiques isolantes est limité et l'augmentation de

température qu'ils induisent par rapport à un contact parfait est d'une dizaine de degrés sur la température des colis en peau. Par contre, l'influence des jeux sur les températures atteintes dans les argilites et/ou dans la barrière ouvragée diminue avec l'éloignement des colis de stockage et devient inférieure à quelques degrés. Dans les alvéoles de déchets B, ces jeux sont plus importants, d'ordre décimétrique. Ce n'est qu'après l'arrêt de la ventilation, qui pourra être maintenue durant quelques années à plusieurs dizaines d'années, que ces jeux influencent la température des colis de déchets (cf. ci-dessous).

### **5.2.2.2 L'effet de la ventilation dans les alvéoles de déchets B exothermiques et les galeries**

Les alvéoles de déchets B sont ventilées durant toute leur phase d'exploitation et jusqu'à leur fermeture. La durée de ventilation après mise en stockage pourra varier entre le temps nécessaire au remplissage de l'alvéole (fermeture immédiate) et quelques années à plusieurs dizaines d'années, voire davantage en fonction des choix en matière de gestion réversible du stockage. L'air de ventilation permet l'évacuation par convection de 80 à 90 % de la chaleur dégagée par l'ensemble des colis. Lorsque la ventilation est maintenue dans l'alvéole après la mise en stockage des colis de déchets, la charge thermique au sein de l'alvéole et dans les argilites du champ proche est moins importante que celle d'une alvéole non ventilée (cf. § 5.5). Après l'arrêt de la ventilation, la température dans les différents composants de l'alvéole augmente et la charge thermique est quasiment équivalente à celle obtenue avec des colis de stockage qui auraient été entreposés préalablement à la mise en place sur des durées équivalentes à celles de la ventilation (Bauer, 2005).

Au niveau des modules de stockage et des zones de stockage, la ventilation des galeries de liaison et des galeries d'accès pendant la phase d'exploitation est dimensionnée pour assurer des conditions de travail compatibles avec une présence humaine. Elle empêche l'élévation de la température de l'air dans les ouvrages, mais participe faiblement à la dissipation de la chaleur (quelques pourcents) et ne modifie donc pas la charge thermique autour des alvéoles de stockage. Après l'arrêt de la ventilation et le remblayage des galeries, les températures augmentent progressivement dans les remblais.

### **5.2.2.3 Le couplage avec la resaturation du stockage**

L'évolution hydraulique des composants des ouvrages, en particulier leur état de saturation, influence la charge thermique. En effet, la conductivité thermique de composants tels que les argiles gonflantes des bouchons ou des barrières ouvragées, les argilites en paroi d'alvéole ou les remblais dépend de leur état de saturation. La conductivité thermique des autres composants des alvéoles, de par leur faible volume (par exemple les chemisages et les revêtements en acier) ou leur présence dans des ouvrages subissant un dégagement de chaleur réduit (par exemple les bétons des alvéoles de déchets B) influence peu la charge thermique. L'évolution hydraulique du stockage montre qu'il n'y a pas de désaturation des argilites autour des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés (cf. § 6). En outre, le transfert de la chaleur est plus rapide que la resaturation des bouchons de ces alvéoles et de la barrière ouvragée spécifiquement dans les alvéoles de combustibles usés. Ainsi, les températures maximales de la charge thermique sont peu influencées par l'évolution hydraulique. En revanche, la charge thermique est influencée par l'évolution hydraulique dès lors que le degré de saturation des bouchons d'alvéoles, des barrières ouvragées, des bétons et des remblais augmente (la conductivité thermique augmentant avec le degré de saturation, le transfert de chaleur devient plus important). Mais, cela se produit soit lorsque la phase thermique a fortement décru, soit après la phase thermique. Par conséquent, l'effet de l'hydraulique sur la thermique est limité à quelques degrés Celsius.

## 5.3 L'organisation spatiale de la charge thermique

### 5.3.1 À l'échelle du stockage et du milieu géologique environnant

#### 5.3.1.1 L'indépendance thermique des zones de stockage

En raison de la décroissance dans le temps de la chaleur émise par les colis de déchets et les colis de combustibles usés, et de la forte cinétique de cette décroissance par rapport à la cinétique de propagation de la chaleur, l'influence thermique d'une zone de stockage ne se fait plus ressentir au-delà d'une distance de l'ordre de quelques centaines de mètres, aussi bien en vertical qu'en horizontal (Bauer, 2005). Ainsi, compte tenu des distances entre les zones de stockage ( $\geq 250$  m), l'interaction thermique entre les différentes zones de stockage se limite à une élévation de température de quelques degrés Celsius au maximum.

#### 5.3.1.2 Une charge thermique affectant principalement le stockage et les argilites du Callovo-Oxfordien

Pour une source de chaleur constante, le temps de transfert de la chaleur depuis le niveau du stockage jusqu'au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien est de l'ordre de plusieurs centaines d'années au millier d'années. Cette durée est largement supérieure à la durée de la décroissance significative du dégagement thermique des colis de déchets. En effet, en première approximation, durant la première centaine d'années, les puissances thermiques des colis de déchets C et des colis de combustibles usés décroissent d'un facteur deux tous les 30 ans (correspondant à la période du  $^{137}\text{Cs}$  qui est le principal contributeur de la puissance thermique). La distance d'interaction thermique correspondant à une durée de 30 ans est de l'ordre de quarante mètres, soit moins que l'épaisseur de garde entre le stockage et le toit ou le mur de la couche du Callovo-Oxfordien (50 mètres en référence au niveau du laboratoire de recherche souterrain). Il en résulte que l'élévation de la température liée au stockage ne croît pas indéfiniment dans le temps, mais passe par un maximum qui est d'autant plus faible que l'on s'éloigne du stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien, et *a fortiori* vers le Dogger sous-jacent et vers la surface à travers l'ensemble des formations sus-jacentes (Figure 5.3.1). La charge thermique affecte donc principalement le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien.

En outre, compte tenu des structures planes des formations géologiques et du stockage, et de la condition de température constante imposée en surface, la charge thermique reste localisée au droit des zones de stockage. Cependant, la conductivité thermique horizontale des argilites étant supérieure à leur conductivité thermique verticale, l'évacuation de la chaleur est sensiblement meilleure dans la direction horizontale que dans la direction verticale (la conductivité thermique horizontale des argilites est de  $1,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$  et leur conductivité verticale est de  $1,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$  (Andra, 2005h, chapitre 27). Il en résulte une légère déformation (anisotropie) du champ thermique au droit du stockage. Enfin, la faible variabilité verticale de la conductivité thermique au sein de la couche du Callovo-Oxfordien n'induit pas de variations sensibles de la charge thermique et ce d'autant plus que l'on s'éloigne des ouvrages. Dans les formations encaissantes de la couche du Callovo-Oxfordien, à mesure que la distance aux ouvrages augmente, les variations de la conductivité thermique n'ont pas ou peu d'effets sur la charge thermique et celle-ci se dissipe de manière homogène.

### 5.3.2 A l'échelle d'une zone de stockage

#### 5.3.2.1 L'effet du chargement thermique progressif lié à l'exploitation progressive d'une zone

Une zone de stockage est exploitée progressivement par module et par alvéole au sein d'un module. Ainsi, le chargement thermique d'une zone de stockage, à l'échelle des modules et à l'échelle des

alvéoles de stockage est progressif. Les distances entre alvéoles de stockage de colis de déchets C ou entre alvéoles de colis de combustibles usés varient de 8 à 25 m selon le type de colis considéré, celles entre modules de l'ordre de 50 à 60 m. Les temps d'interactions thermiques pour ces distances varient respectivement de quelques années à plus d'une centaine d'années. Ces temps sont grands par rapport aux durées de chargement d'un module ou par rapport aux délais entre le chargement de deux modules adjacents. Il en résulte que les « décalages » liés à une exploitation progressive d'une zone de stockage affectent peu la charge thermique globale d'un module, puis d'une zone de stockage.

### **5.3.2.2 Un comportement thermique similaire entre modules et entre alvéoles d'un même module**

Pour une même zone de stockage, seuls les modules immédiatement voisins interagissent thermiquement du fait de distances de 50 à 60 m entre deux modules adjacents. Compte tenu de l'organisation spatiale du stockage et de son exploitation progressive (donc d'un chargement thermique progressif), chaque module de stockage présente alors une évolution thermique identique qui se répète dans l'espace pour constituer l'évolution thermique globale d'une zone de stockage et du milieu géologique environnant. Il en va de même pour les alvéoles de stockage d'un même module.

### **5.3.2.3 Une uniformisation de la charge thermique au niveau des modules, puis de la zone de stockage**

Dans un module de stockage, chaque alvéole atteint rapidement sa température maximale indépendamment des autres alvéoles. Puis, les dégagements de chaleur émis par les alvéoles se combinent et des élévations de température, plus basses, mais relativement homogènes, affectent graduellement l'ensemble du module. Le champ de température passe ainsi progressivement d'une somme de points chauds indépendants, correspondant aux alvéoles, à un unique point chaud correspondant au module de stockage (Figure 5.4.4 et Figure 5.4.5).

La charge thermique affecte dans un premier temps les alvéoles dans lesquelles sont introduits les colis de déchets. Le maintien de la ventilation dans les galeries d'accès durant l'exploitation d'un module, uniquement dimensionnée pour assurer des conditions de travail compatibles avec une présence humaine, empêche le réchauffement des galeries d'accès. Ainsi, l'uniformisation de la charge thermique au sein d'un module ne peut avoir lieu qu'après sa fermeture. De la même manière, l'uniformisation de la charge thermique à l'échelle d'une zone de stockage ne démarre qu'à partir de sa fermeture.

### **5.3.2.4 L'effet du positionnement du stockage sur la zone de transposition**

La charge thermique à l'échelle de l'alvéole, du module et de la zone de stockage est spécifique du type de déchets et du concept de stockage considéré. En effet, les niveaux de température, les dates d'atteinte des températures maximales, les cinétiques de montée et de baisse de la température et les gradients thermiques dépendent de l'évolution du dégagement de chaleur des colis de déchets (et par conséquent de la durée d'entreposage préalable au stockage) et des propriétés thermiques des composants de l'alvéole. *A contrario*, la charge thermique du stockage dépend peu de la position du stockage sur la zone de transposition. En effet, la profondeur du niveau d'implantation du stockage variant de 500 à 630 m sur la zone de transposition (cf. § 3.3.1.1), la température initiale des argilites n'augmente que de 2 – 3 °C avec l'approfondissement. Dans la suite, la charge thermique est décrite pour un stockage situé en référence à 500 m de profondeur, correspondant à la position du laboratoire de recherche souterrain. À cet endroit, la température initiale des argilites est de 22 °C (cf. § 3.2.4 et (Andra, 2005h, chapitre 8)).

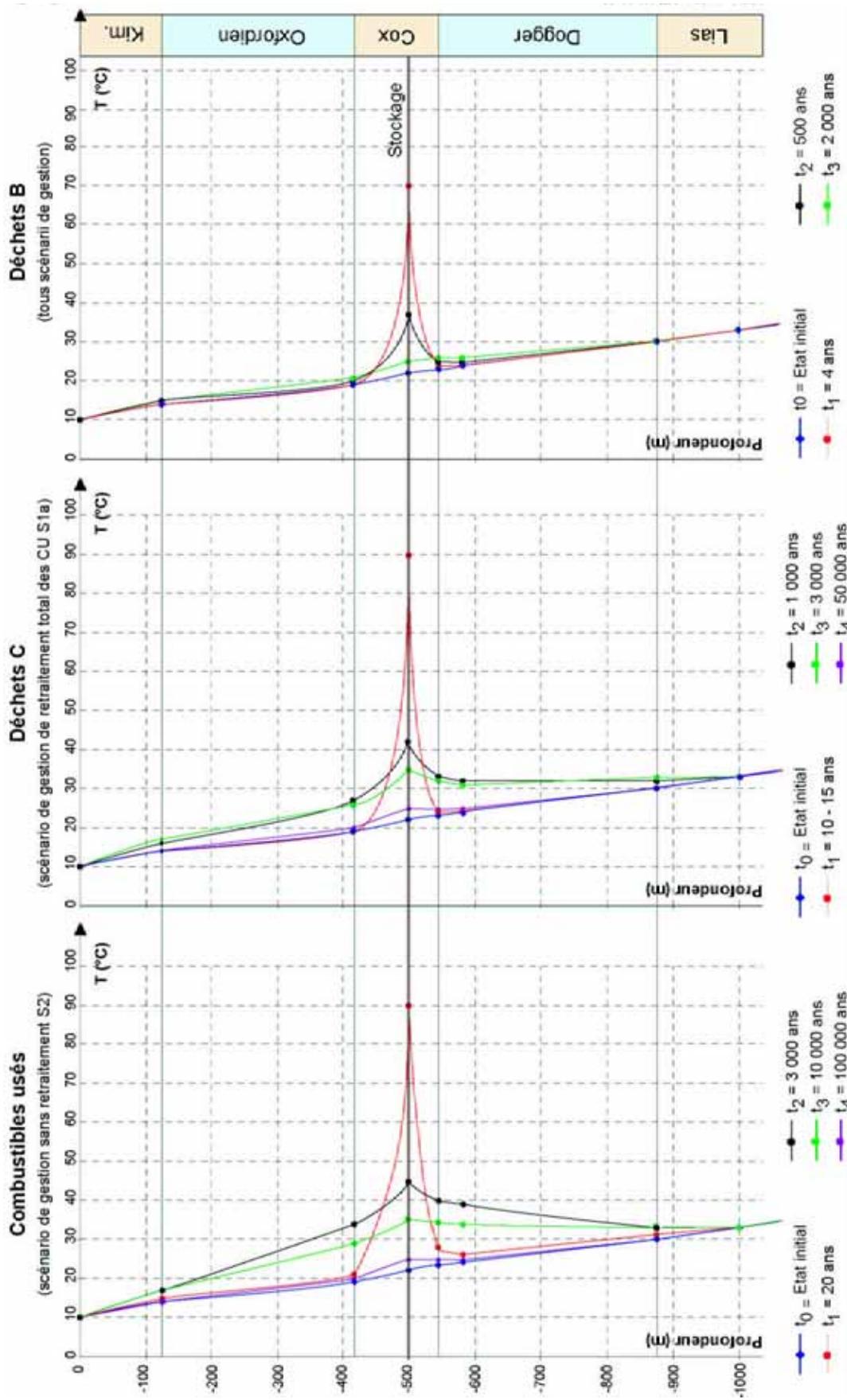


Figure 5.3.1 La charge thermique des différentes zones de stockage à l'échelle du site

## 5.4 Les charges thermiques des zones de stockage de déchets C et de combustibles usés

Le concept de stockage (nombre de colis et d'intercalaires par alvéole, distances entre alvéoles, durée d'entreposage préalable des colis) étant adapté à chaque type de colis (et à chaque concept) et fondé sur le même respect du critère de température maximale admissible de 90 °C dans les argiles (argilites et argile gonflante – Encadré 2.5), les niveaux de température atteints au sein et autour des alvéoles de déchets C ou de combustibles usés sont proches pour les différents types de colis. Les écarts se situent essentiellement dans les durées de montée en température et, de manière plus marquée, dans les durées de décroissance thermique qui sont plus longues pour les combustibles usés que pour les déchets C.

Le nombre de colis types de déchets C ou de combustibles usés varie selon le scénario de gestion des combustibles nucléaires envisagé (Tableau 2.3.4). La charge thermique des zones de déchets C est évaluée pour le scénario de retraitement complet des combustibles usés UOX et MOX (scénario S1a) où le nombre de colis types de déchets C est maximal. Celle des zones de combustibles usés est évaluée pour le scénario sans retraitement des combustibles usés (scénario S2) comprenant le stockage direct de combustibles usés UOX et MOX.

### 5.4.1 À l'échelle d'une alvéole de stockage

Le maximum de température de 90 °C à l'interface chemisage / argilites est atteint environ 10 - 15 ans après la mise en place des colis dans les alvéoles de déchets C. Dans les alvéoles de combustibles usés, ce maximum est atteint un peu plus tardivement (20 ans après la mise en place des colis) à l'interface chemisage / barrière ouvragée d'argile gonflante.

Les maxima de température dans les différents composants de l'alvéole, qui sont d'autant plus faibles que l'on s'éloigne des colis, sont atteints en quelques dizaines d'années à proximité des colis et en une centaine d'années ou deux cents années en périphérie des alvéoles.

La température des argilites à mi-distance entre deux alvéoles ne dépasse pas 60 – 65 °C. Ce maximum est atteint vers 30 - 50 ans pour les colis types C1 et C2 de déchets C, à 100 ans pour les colis types C3 et C4 et, entre 100 et 200 ans pour les combustibles usés. La température maximale sur la face interne du bouchon d'alvéole de 70 – 75 °C est atteinte vers 15 - 20 ans pour les déchets C et les combustibles usés de type CU1 et vers 50 - 100 ans pour les combustibles usés de type CU2. Sur la face externe du bouchon d'alvéole, elle n'est plus que de 50-55 °C et est atteinte vers 50 - 100 ans pour les déchets C et vers 150 - 200 ans pour les combustibles usés (Figure 5.4.1 et Figure 5.4.2).

La température au cœur des colis types C3 ou C4 ou des colis de combustibles usés passe en dessous de 50 °C vers 1 000 - 1 500 ans. Pour les colis types C0 et C1/C2 de déchets C, le retour à 50 °C au cœur des colis est atteint vers 150 ans et 650 ans respectivement.

Ces évolutions temporelles de la température et les dates d'atteintes des maxima de température dans les différents composants des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés sont cohérentes avec les évaluations effectuées avec des concepts similaires pour un stockage dans l'argile à Opalinus étudié par la Nagra (Johnson *et al.*, 2002).

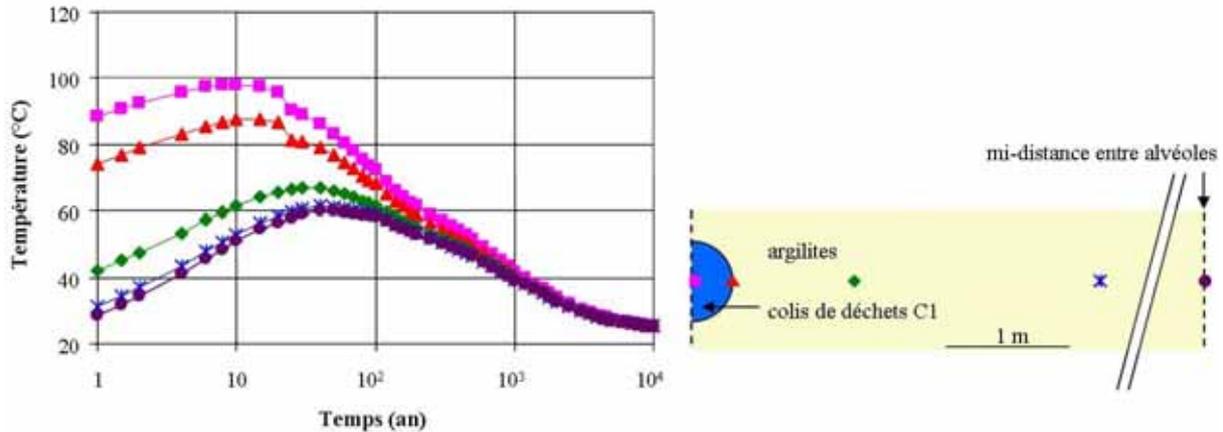


Figure 5.4.1 Evolution de la température dans et autour d'une alvéole de déchets C1 (durée d'entreposage de 60 ans)

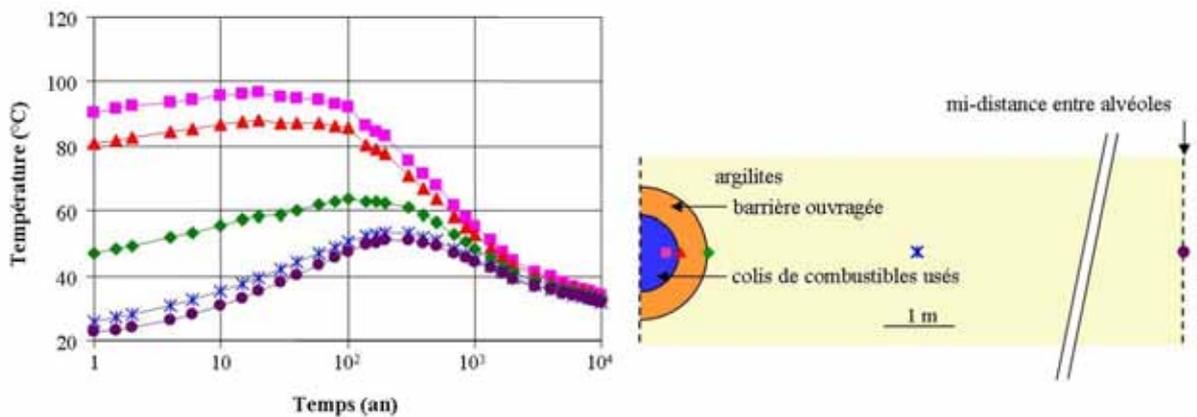


Figure 5.4.2 Evolution de la température dans et autour d'une alvéole de combustibles usés CU2 (durée d'entreposage de 90 ans)

#### 5.4.2 À l'échelle d'un module de stockage

L'interaction thermique entre les alvéoles de stockage au sein d'un même module et entre deux modules adjacents devient significative à partir de quelques dizaines d'années pour les zones de déchets C et à partir de quelques centaines d'années pour les zones de combustibles usés.

Les temps d'uniformisation de la température sont également plus importants pour les combustibles usés que pour les déchets C : une température uniforme de l'ordre de 45 – 50 °C est atteinte vers 1 000 ans au sein d'un module de déchets C. Au sein d'un module de combustibles usés, elle n'est atteinte que vers 3 000 ans. L'uniformisation de la température et le refroidissement sont plus rapides au niveau du module de colis types C0, colis types dégageant moins de chaleur que les autres colis types de déchets C (Figure 5.4.4 et Figure 5.4.5).

La température maximale atteinte au niveau des galeries d'accès est de 50 – 55 °C. Elle est atteinte entre 50 ans et 100 ans pour les déchets C et vers 200 ans pour les combustibles usés dans l'hypothèse d'un remblayage rapide des galeries d'accès après la mise en place des colis dans les alvéoles (Figure 5.4.3). En fonction des choix en matière de gestion réversible du stockage, les galeries pourront rester ouvertes sur des durées plus importantes. La ventilation empêche alors l'élévation de la température de l'air dans les galeries et les températures atteintes au voisinage immédiat des galeries sont moins importantes.

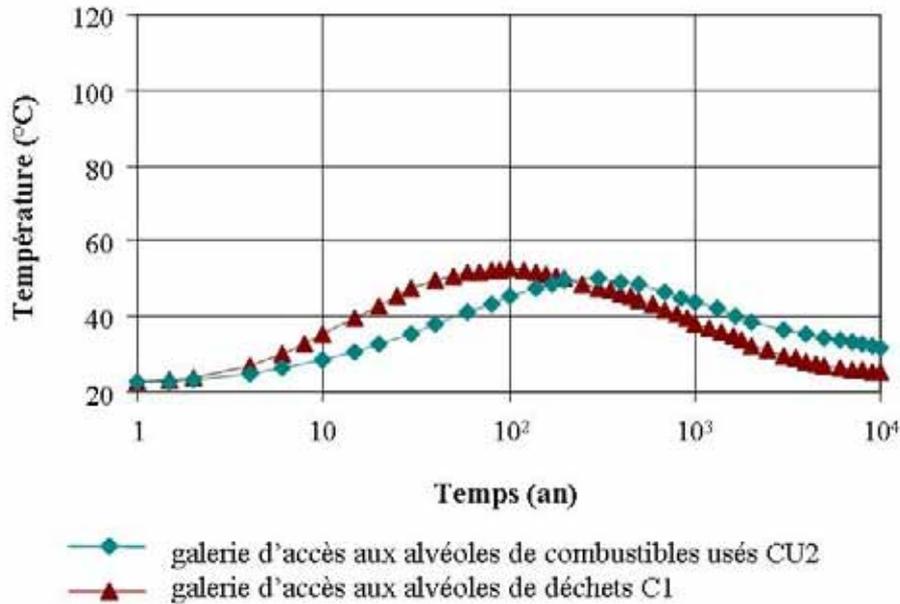


Figure 5.4.3 Évolution de la température au cœur des galeries d'accès aux alvéoles de combustibles usés CU2 (durée d'entreposage de 90 ans) et aux alvéoles de déchets C1 (durée d'entreposage de 60 ans) dans l'hypothèse d'un remblayage rapide des galeries d'accès (30 ans après la mise en place des colis)

### 5.4.3 À l'échelle d'une zone de stockage

À l'échelle de la zone de stockage, une température uniforme de l'ordre de 30 – 35 °C est atteinte vers 3 000 ans pour les déchets C et vers 10 000 ans pour les combustibles usés. Les galeries de liaison où sont implantés les scellements de zone subissent une température maximale de 30 – 35 °C (vers 700 ans pour les déchets C et vers 1 500 - 2 000 ans pour les combustibles usés). À 250 m des différentes zones de stockage, l'élévation de température ne dépasse pas quelques degrés Celsius (Figure 5.4.4 et Figure 5.4.5).

### 5.4.4 À l'échelle du site

La totalité de l'épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien à l'aplomb des zones de stockage subit une élévation de la température consécutive à la mise en place des colis de combustibles usés et des colis de déchets C. Les températures maximales sont atteintes au sein des zones du stockage (la température maximale de 90 °C étant atteinte à la paroi des alvéoles de déchets C et dans la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés). Au mur du Callovo-Oxfordien, la température atteint un maximum de 45 °C vers 500 ans (soit une élévation de température de 22 °C). Au toit du Callovo-Oxfordien, le maximum de température de 35 °C est atteint vers 1 000 ans (soit une élévation de température de 16 °C). À l'interface Oxfordien carbonaté / Kimméridgien, la température maximale est de 20 °C (soit une élévation de température de 5 °C). Au niveau de la surface du sol, le stockage n'induit aucun réchauffement sensible (Figure 5.3.1).

À 10 000 ans, l'élévation de température au sein de la couche du Callovo-Oxfordien à l'aplomb des zones de stockage est relativement uniforme et ne dépasse pas 10 °C. Le retour au champ géothermal initial ( $\pm 5$  °C) a lieu vers 50 000 ans pour les zones de déchets C et vers 100 000 ans pour les zones de combustibles usés.

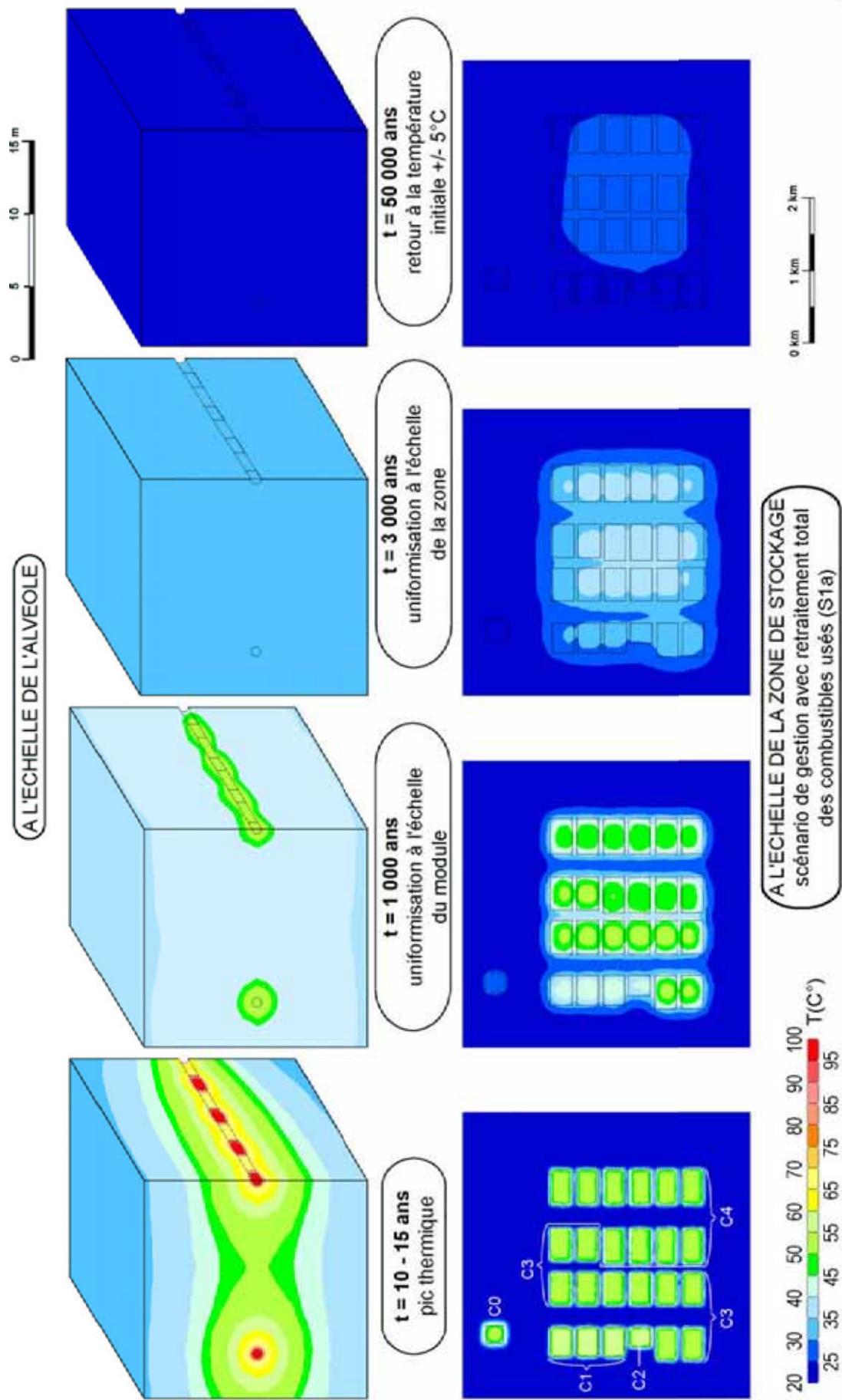


Figure 5.4.4 Représentation de la charge thermique de la zone de stockage des déchets C à différents temps (scénario de gestion des combustibles usés S1a)

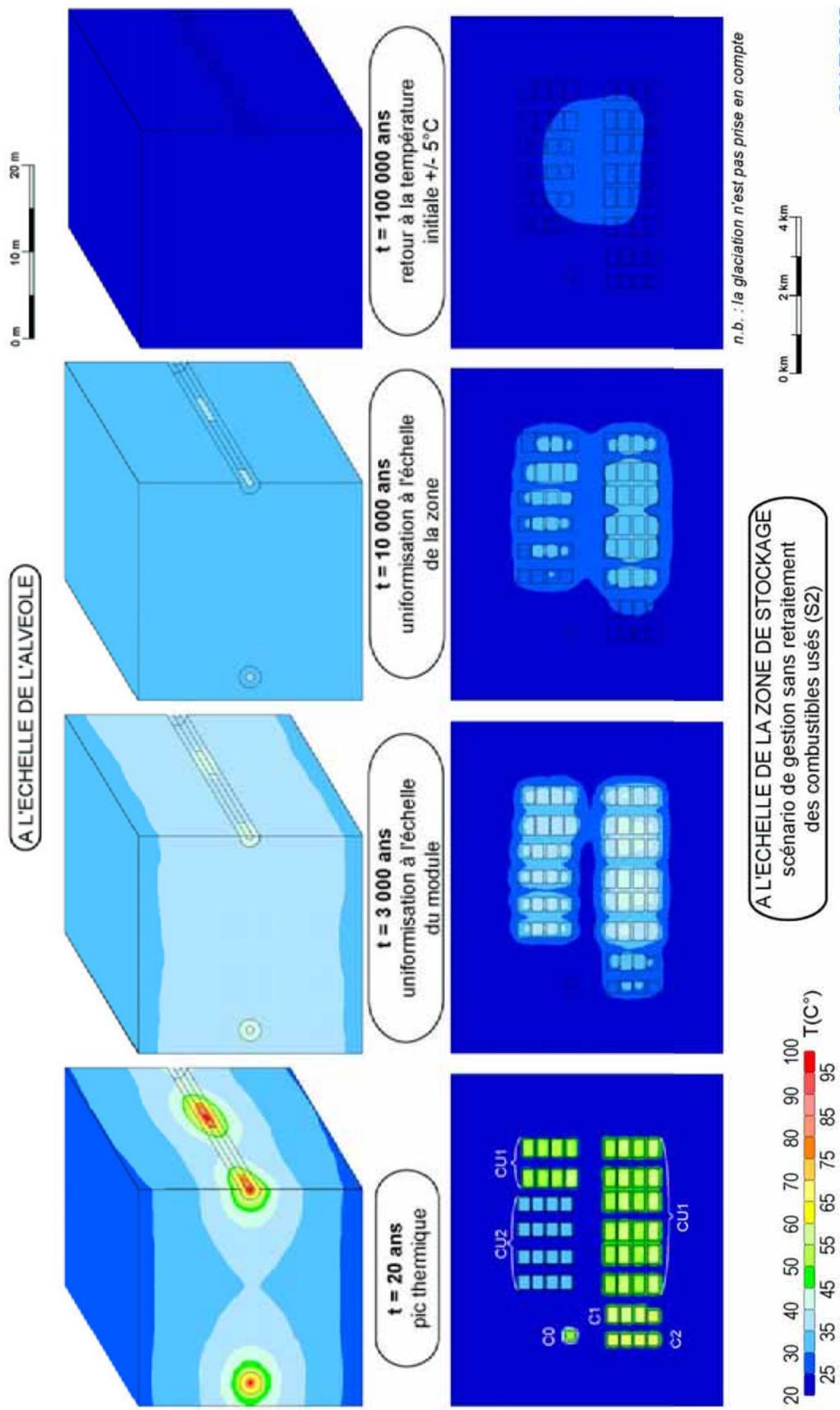


Figure 5.4.5 Représentation de la charge thermique des zones de stockage des combustibles usés à différents temps (scénario de gestion des combustibles usés S2)

## 5.5 La charge thermique de la zone de stockage de déchets B

Compte tenu du plus faible dégagement thermique des déchets B, les niveaux de température et les temps caractéristiques de la charge thermique sont moins importants que pour les déchets C et les combustibles usés.

Du point de vue de la répartition des différents colis types de déchets B, les alvéoles contenant principalement les déchets exothermiques sont regroupées dans une sous-zone de la zone de stockage de déchets B. Les alvéoles contenant les déchets bitumés, non exothermiques ou peu exothermiques, sont regroupées dans une autre sous-zone distante d'une centaine de mètres environ de celle des alvéoles contenant des déchets exothermiques (Figure 5.5.3).

La charge thermique des déchets B est présentée avec l'hypothèse d'une fermeture immédiate des alvéoles de stockage, c'est-à-dire sans période de ventilation après la mise en place des colis de déchets. Une ventilation de ces alvéoles durant quelques années à quelques dizaines d'années a pour conséquence des niveaux de température inférieurs des composants des alvéoles et des argilites en champ proche (cf. § 5.2.2). À titre illustratif, la charge thermique d'une alvéole de colis types B5.2 avec l'hypothèse d'une durée de ventilation de 10 ans après mise en stockage est également présentée.

Concernant une alvéole contenant des colis types B5.2, déchets B les plus exothermiques, en l'absence de ventilation de l'alvéole, le maximum de température est atteint dans le béton de revêtement dès les premières années après la mise en place des colis (60 °C). Les argilites en paroi d'alvéole subissent une température maximale de l'ordre de 50 °C (environ 10 ans après la mise en place des colis). L'uniformisation de la température à l'échelle de l'alvéole est atteinte environ 500 ans après la mise en place des colis (température inférieure à 30 °C) (Figure 5.5.1).

Lorsqu'une ventilation est maintenue dans l'alvéole (débit d'air de  $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), l'air de ventilation permet l'évacuation de 80 à 90 % de la chaleur dégagée par les colis. Au cœur de l'alvéole, la température maximale est également atteinte les premières années après la mise en place des colis, mais ne dépasse pas 40 °C. La température atteinte dans les argilites en paroi des alvéoles est alors inférieure à 35 °C. Après l'arrêt de la ventilation, la température au cœur de l'alvéole augmente jusqu'à 55 °C, les argilites en paroi des alvéoles atteignent une température maximale de 45 °C environ. Une ventilation de l'alvéole durant une dizaine d'années a ainsi pour conséquence une température maximale inférieure de 15 °C au cœur de l'alvéole et de 5 °C dans les argilites en paroi des alvéoles. Les températures des différents composants de l'alvéole après l'atteinte des maxima sont légèrement supérieures (5 °C environ) à celles évaluées sans période de ventilation (Figure 5.5.2).

Autour d'une alvéole contenant des colis de déchets bitumés (colis types B2), la température reste inférieure à 25 °C quel que soit le point considéré dans et autour de l'alvéole (soit une élévation de température inférieure à 3 °C). Au cœur de l'alvéole, le pic de température est atteint 3 - 4 ans après la mise en place des colis. Ailleurs, celui-ci n'est atteint que vers 700 ans et est dû aux alvéoles voisines. L'influence des alvéoles de colis types B3 voisines se fait sentir à partir de 100 ans et le réchauffement supplémentaire induit (au maximum 3 °C) intervient à long terme et donc, au-delà du pic thermique (Figure 5.5.1). L'influence des zones de stockage des déchets C et des zones de stockage des combustibles usés intervient plus tardivement (au-delà de 10 000 ans) et le réchauffement induit est de 1 à 2 °C.

Du fait de la répartition des déchets B en deux sous-zones, la charge thermique est spécifique de chaque sous-zone. La température au sein de la sous-zone de déchets bitumés n'augmente que de quelques degrés et reste toujours homogène à 25 °C environ. La température au sein de la sous-zone de déchets exothermiques s'uniformise vers 2 000 ans à 25 °C (Figure 5.5.3).

La température de la couche du Callovo-Oxfordien à l'aplomb de la zone de stockage des déchets B, de 50 °C au maximum à proximité immédiate des alvéoles subit une élévation maximale de 2 °C au mur et au toit du Callovo-Oxfordien (atteinte respectivement à 1 000 et 1 700 ans). Le retour au champ géothermal initial ( $\pm 5$  °C) a lieu vers 2 000 ans (Figure 5.3.1).

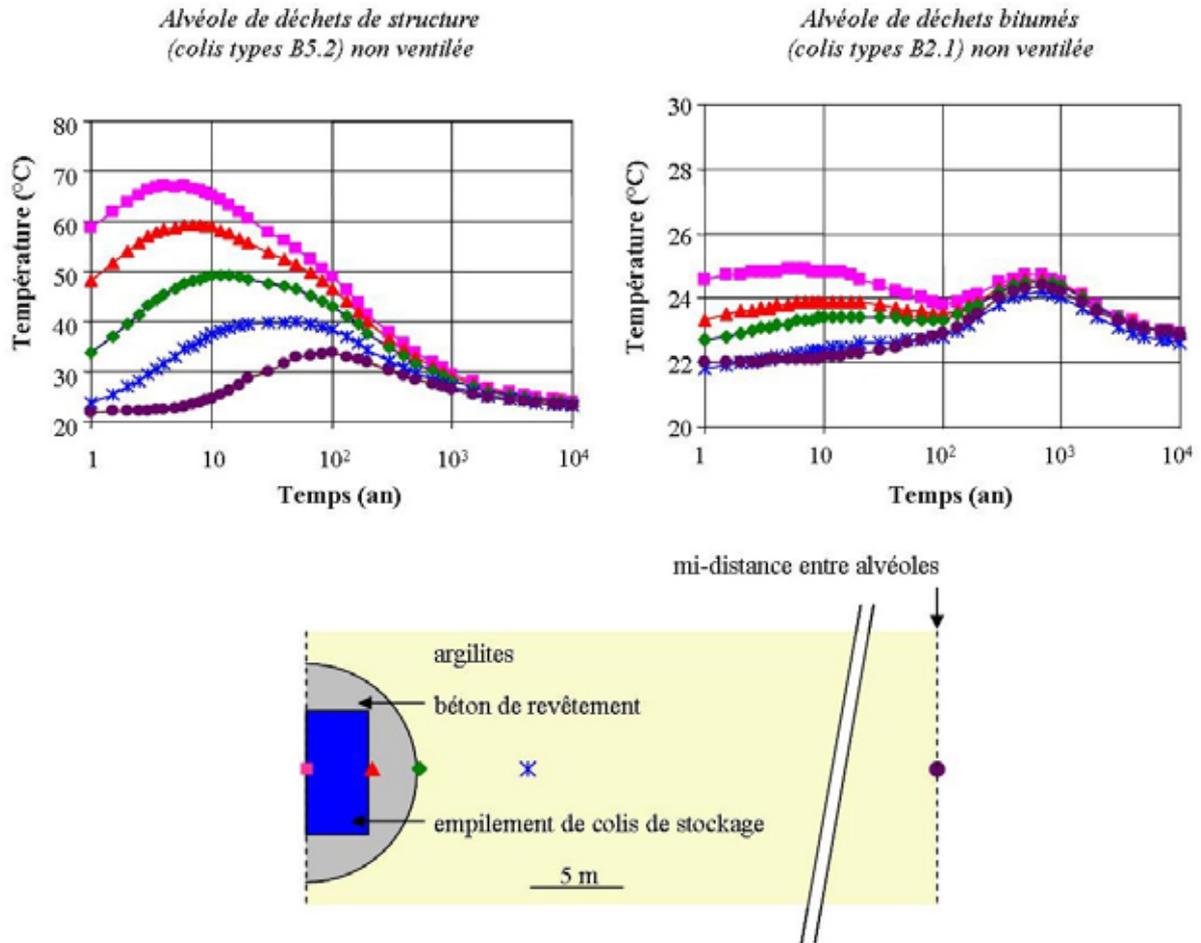


Figure 5.5.1 Évolution de la température dans et autour d'une alvéole de déchets B de structure (colis types B5.2 mis en stockage après une durée d'entreposage de 10 ans) et d'une alvéole de boues bitumées (colis types B2.1 mis en stockage après une durée d'entreposage d'1 an) : sans période de ventilation après mise en place des colis

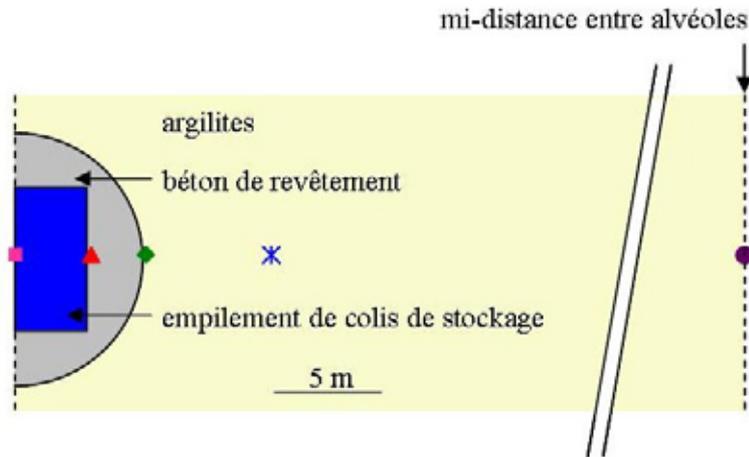
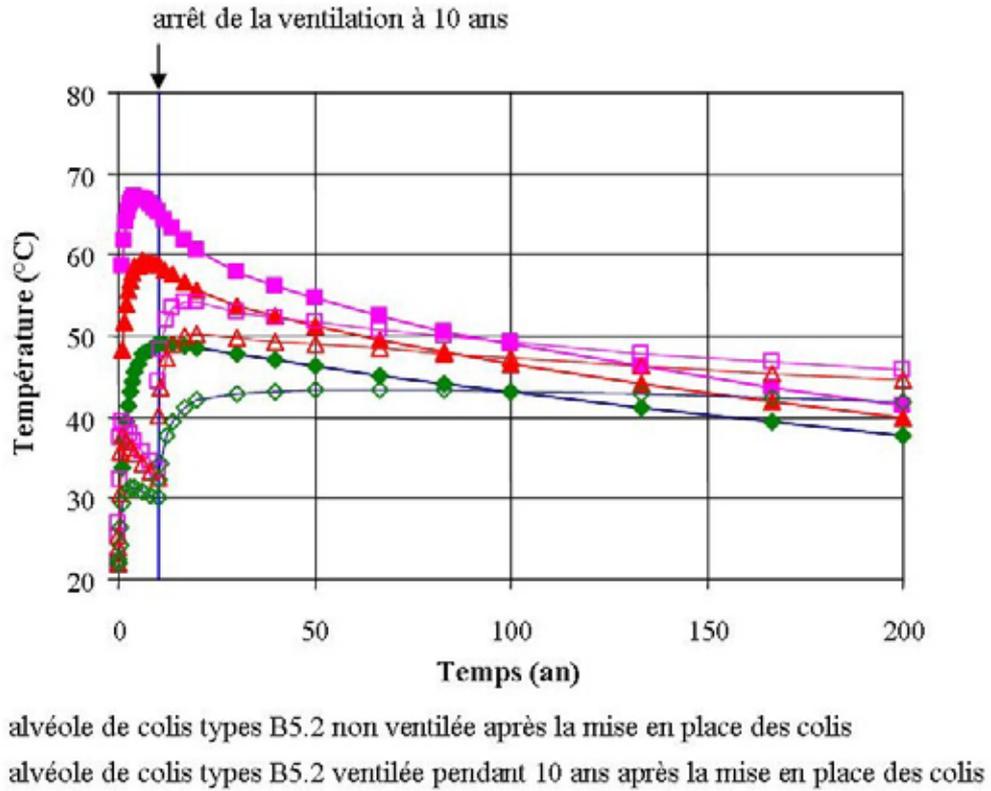


Figure 5.5.2 Évolution de la température dans et autour d'une alvéole de colis types B5.2 (mis en stockage après une durée d'entreposage de 10 ans) : sans période de ventilation après mise en place des colis et avec une ventilation maintenue durant 10 ans

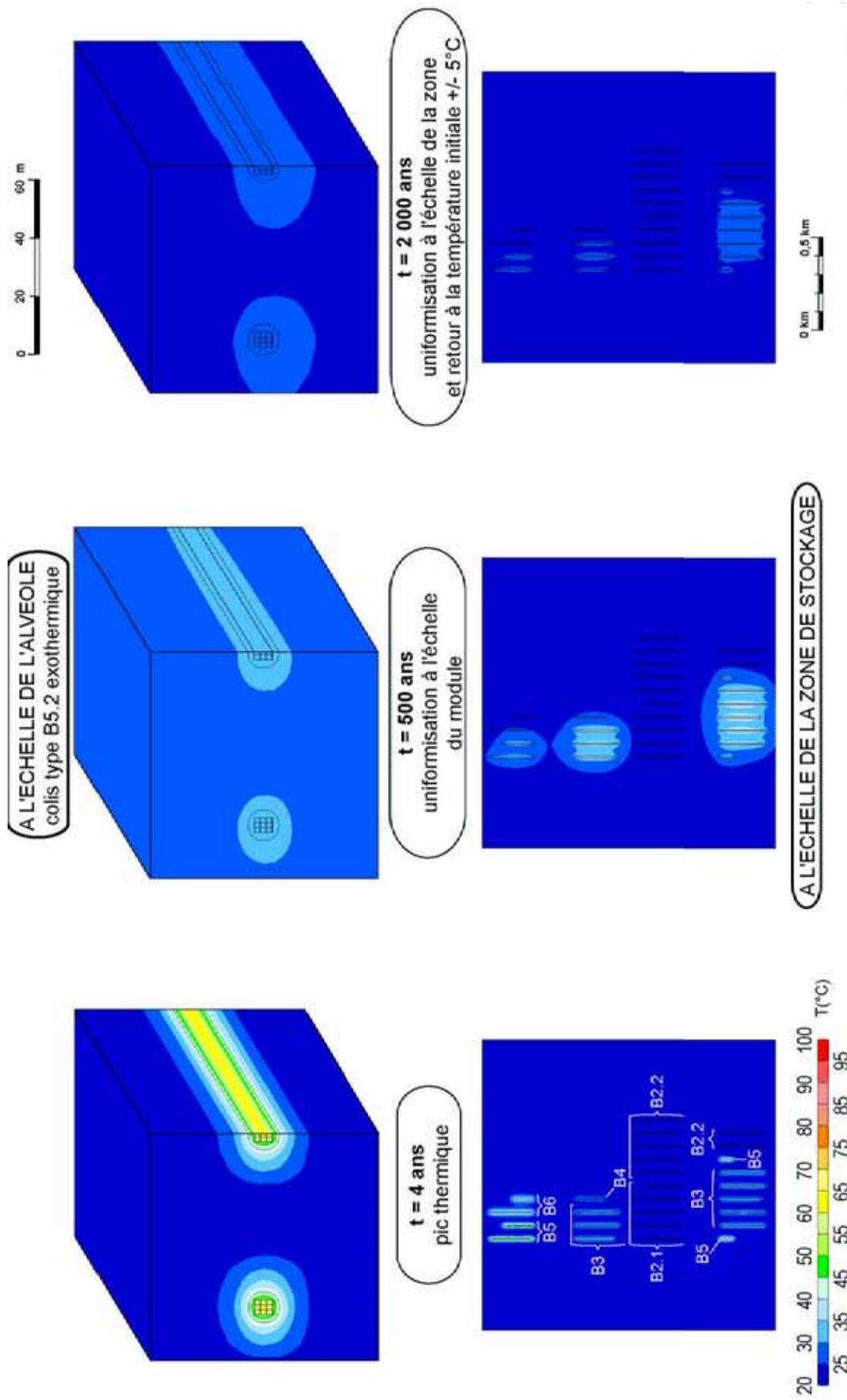


Figure 5.5.3 Représentation de la charge thermique de la zone de stockage des déchets B à différents temps avec l'hypothèse d'une fermeture immédiate des alvéoles après la mise en place des colis

## 5.6 Synthèse sur la charge thermique du stockage

Quelques éléments de l'évolution thermique du stockage et des zones de stockage peuvent être dégagés dans la perspective des descriptions des évolutions hydraulique, chimique, et mécanique, et *in fine* du relâchement et la migration des radionucléides (Tableau 5.6.1 et Figure 5.6.1).

### 5.6.1 L'indépendance thermique des zones de stockage

Du point de vue thermique, les différentes zones de stockage (distantes de 250 m) sont (quasi)indépendantes. En effet, du fait de la décroissance temporelle de la chaleur émise par les colis de déchets, l'influence thermique des différentes zones de stockage est négligeable au-delà de 100 à 250 m, aussi bien dans la direction verticale (vers les encaissants) que dans la direction horizontale (plan médian de la couche du Callovo-Oxfordien où seraient implantées les différentes zones de stockage). La charge thermique du stockage se présente comme une somme de charges thermiques centrées sur les différentes zones de stockage et affectant chacune des volumes de milieu géologique centrés sur ces zones.

### 5.6.2 Des températures maximales atteintes à court terme dans les alvéoles de stockage

Les maxima de température sont atteints au sein des alvéoles de stockage. Les temps d'atteinte sont courts : quelques années pour les déchets B les plus exothermiques (60 °C) et entre 10 et 20 ans pour les déchets C et les combustibles usés (90 °C).

### 5.6.3 Une uniformisation des températures dans les modules de stockage et les zones de stockage

Les températures s'uniformisent à l'échelle des modules de stockage de déchets B à environ 500 ans (température de l'ordre de 35 °C). À l'échelle des modules de déchets C, elles s'uniformisent à environ 1 000 ans et à l'échelle des modules de combustibles usés à environ 3 000 ans (températures similaires des déchets C et des combustibles usés de l'ordre de 40 à 45 °C).

À l'échelle des zones de stockage, une uniformisation des températures est atteinte plus tard : à environ 2 000 ans pour les déchets B (25 °C), 3 000 ans pour les déchets C et 10 000 ans pour les combustibles usés (températures similaires des déchets C et des combustibles usés de l'ordre de 30 à 35 °C).

En outre, ces uniformisations sont atteintes avec la décroissance des températures.

### 5.6.4 Des gradients thermiques globalement modérés

Comme pour les élévations de température, la charge thermique est caractérisée par des gradients thermiques qui évoluent dans le temps.

Les gradients thermiques maxima sont atteints à l'intérieur des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés dans les premières années après la mise en stockage des colis de déchets. Ils sont alors de l'ordre de quelques dizaines de degrés Celsius par mètre (°C.m<sup>-1</sup>). Au-delà de 100 ans, ils sont inférieurs à la dizaine de degrés Celsius par mètre et diminuent ensuite rapidement avec l'uniformisation de la température.

Dans la couche du Callovo-Oxfordien, les gradients de température maxima sont très faibles, quelques °C.m<sup>-1</sup>, et concernent la proximité immédiate des alvéoles (quelques décimètres à quelques mètres), ceci sur une période de 100 ans environ.

Les gradients de température dans le stockage et en champ proche s'amenuisent rapidement (après 100 ans environ) avec l'uniformisation des températures à l'échelle des zones de stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien.

Dans le plan vertical des zones de stockage, à partir de quelques mètres dans la couche du Callovo-Oxfordien puis dans les formations encaissantes, les gradients de température créés sont faibles, inférieurs au °C.m<sup>-1</sup> et plus généralement au 1/10 °C.m<sup>-1</sup>.

Dans le plan horizontal, l'influence thermique entre les zones de stockage reste limitée à quelques degrés Celsius et n'a lieu qu'après une centaine d'années environ. Les gradients thermiques horizontaux associés sont eux aussi faibles à très faibles (inférieurs au 1/10 °C.m<sup>-1</sup>).

### 5.6.5 Une durée limitée de la charge thermique

Le retour au champ géothermal initial dans le stockage (en prenant comme référence un écart de température avec le champ géothermal inférieur à 5 °C) a lieu vers 2 000 ans pour les déchets B, vers 50 000 ans pour les déchets C et vers 100 000 ans pour les combustibles usés.

Bien que ce retour s'effectue relativement lentement, les températures diminuent rapidement et la durée de l'essentiel de la charge thermique dans le stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien ne concerne que quelques milliers d'années. La température au cœur des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés est de l'ordre de 50 °C respectivement à 500 ans et 1 000 ans. Dans les alvéoles de déchets B exothermiques (colis types B5.2), la température est inférieure à 35 °C après 500 ans (Tableau 5.6.1).

Cette durée est petite devant (i) la centaine de milliers d'années environ des évolutions climatiques de surface (cycles glaciaire-interglaciaire) et (ii) les millions à dizaines de millions d'années (voire au-delà) des processus thermiques moteurs de l'évolution naturelle des formations sédimentaires (transformations minéralogiques, transformations de la matière organique) (cf. § 3.3.1.3).

Par conséquent, l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique se fait essentiellement en condition géothermale naturelle. Plus particulièrement, comme cela sera vu dans les évolutions chimique et mécanique, les durées d'étanchéité des surconteneurs de déchets C et des conteneurs de combustibles usés liées à la corrosion et à la tenue mécanique (respectivement au moins 4 000 ans et 10 000 ans) sont telles que le relâchement, puis la migration des radionucléides sont peu ou pas affectés par la charge thermique.

### 5.6.6 Des charges thermiques faibles sur la couche du Callovo-Oxfordien « en grand » et sur les formations encaissantes

L'élévation de température dans les formations encaissantes de la couche du Callovo-Oxfordien reste limitée : elle est au maximum de 20 °C environ au toit et au mur du Callovo-Oxfordien, de 5 °C au toit de l'Oxfordien carbonaté, et inférieure à 1 °C pour les formations du Kimméridgien et des Calcaires du Barrois.

Par conséquent, si en outre on tient compte de sa durée limitée, la charge thermique n'est pas un paramètre déterminant des évolutions phénoménologiques « en grand » de la couche du Callovo-Oxfordien et des formations encaissantes. En particulier, les niveaux de température (inférieurs à 90 °C dans les matériaux argileux) et les durées de chauffe (globalement inférieures à 10 000 ans)

n'entraînent pas de transformations minéralogiques significatives des argilites et des argiles gonflantes.

### **5.6.7 La sensibilité de l'analyse vis-à-vis du processus de gestion réversible**

L'évaluation de la réversibilité est menée par rapport aux conditions de températures susceptibles d'être rencontrées dans le stockage et dans le milieu géologique environnant, pour une période d'exploitation séculaire à pluriséculaire.

Les conditions de température dans les différents composants du stockage pour une éventuelle reprise des colis de déchets lorsque l'exploitation est réalisée sur une durée séculaire (référence utilisée dans cette analyse) sont présentées dans ce chapitre.

Selon les choix de gestion, l'exploitation du stockage peut être envisagée sur une durée pluriséculaire. Ce paragraphe examine les conséquences possibles pour les phénomènes thermiques. On considère en particulier l'effet de l'accroissement de la durée avant la fermeture d'une zone de stockage ou de la durée entre la réalisation des modules d'une même zone de stockage.

#### **5.6.7.1 L'accroissement de la durée avant la réalisation d'une zone ou d'un module d'une zone de stockage**

La conception du stockage en zones de stockage dédiées séparées de plusieurs centaines de mètres rend les zones de stockages quasi indépendantes sur le plan thermique. De ce fait, tout décalage de réalisation, d'exploitation ou de fermeture d'une zone par rapport à une autre n'aurait pas d'effet sur la charge thermique des zones et de leur milieu géologique environnant.

En revanche, à architecture constante, cela signifierait une augmentation *de facto* du temps d'entreposage préalable des déchets C et des combustibles usés et, par conséquent, une diminution de la puissance thermique des colis au moment de la mise en stockage. En première approximation, les puissances thermiques des déchets C et des combustibles usés diminuant d'un facteur deux tous les trente ans durant la première centaine d'années, un entreposage préalable des colis de stockage prolongé de 30 ans se traduirait par une charge thermique deux fois plus petite.

Les distances entre les modules sont plus petites que celles entre les zones de stockage, mais elles restent suffisantes pour que la température maximale d'un module soit indépendante des autres modules, en particulier des modules adjacents. En revanche, les températures d'uniformisation des zones de stockage de déchets C et des zones de stockage des combustibles usés, ainsi que les temps d'atteinte de ces uniformisations, dépendent des interactions entre modules. Un accroissement de la durée entre la réalisation des modules d'une zone de stockage aurait pour conséquence une durée d'entreposage préalable des colis de stockage plus longue. À architecture constante, il en résulterait une diminution de la température d'uniformisation de la zone de stockage. Ces phénomènes n'affectent pas sensiblement les conclusions présentées ci-dessus.

#### **5.6.7.2 L'accroissement de la durée avant la fermeture d'une zone de stockage ou d'un module des zones de stockage de déchets C ou de combustibles usés**

Les zones de stockage de déchets C et les zones de stockage des combustibles usés sont dimensionnées pour que la charge thermique ne dépende pas de la ventilation des galeries. Tout accroissement de la durée avant la fermeture d'un module ou d'une zone de stockage n'aurait donc pas d'effet sur la charge thermique dans les alvéoles et dans le milieu géologique à leur voisinage. En revanche, cela entraînerait des températures moins élevées des remblais et des scellements.

### **5.6.7.3 L'accroissement de la durée avant la fermeture d'une alvéole de déchets B**

La ventilation d'une alvéole de déchets B évacue une grande partie du dégagement de chaleur des colis, et joue donc un rôle important sur la charge thermique dans l'alvéole et dans le milieu géologique environnant. Tout accroissement de la durée avant la fermeture d'une alvéole de déchets B avec le maintien d'une ventilation diminue cette charge thermique.

La décroissance de la puissance thermique des colis de déchets B les plus exothermiques est particulièrement importante durant la première centaine d'années après le conditionnement des déchets : par exemple, la diminution est d'un facteur 4 à 7 entre 10 ans et quelques centaines d'années pour les colis types B5, au-delà, la diminution est plus lente. Par conséquent, une augmentation de la durée avant la fermeture d'une alvéole de déchets B exothermiques de plusieurs dizaines d'années diminuerait significativement la charge thermique de cette alvéole, pour se ramener à quelques degrés Celsius de la charge thermique d'une alvéole de colis de déchets B peu exothermiques comme les colis types B2.

En conséquence, le schéma thermique demeure globalement valable pour des durées d'ouverture plus longues. Ces dernières auraient principalement pour effet d'abaisser plus ou moins fortement la charge thermique, renforçant encore les conclusions générales sur son impact limité.

Tableau 5.6.1 Principales caractéristiques des charges thermiques des différentes zones de stockage (stockage situé à 500 m de profondeur)

Zone de déchets B		Zones de déchets C (scénario de retraitement complet des combustibles usés UOX et MOX - S1a)	Zones de combustibles usés (scénario avec stockage direct des combustibles usés UOX et MOX - S2)	
<b>Paroxysme thermique (température et date)</b>	<i>Exemple de l'alvéole de déchets de structure exothermiques colis types B5.2 :</i>			
	$T_{\max} = 60\text{ °C}$ à 4 ans (dans le béton de revêtement)	$T_{\max} = 90\text{ °C}$ à 10-15 ans (à l'interface chemisage / argilites)	$T_{\max} = 90\text{ °C}$ à 20 ans (à l'interface chemisage / barrière ouvragée)	
$T_{\max} = 50\text{ °C}$ vers 10 ans (dans les argilites en paroi d'alvéole)	$T_{\max} = 70\text{ °C}$ vers 20-150 ans (à l'interface barrière ouvragée / argilites)			
<b>Uniformisation (température et date)</b>	À l'échelle du stockage	alvéole	$T_{500\text{ans}} = 45 - 55\text{ °C}$	
		module	$T_{1\,000\text{ans}} = 40 - 45\text{ °C}$	
		zone	$T_{3\,000\text{ans}} = 30 - 35\text{ °C}$	
	À l'échelle du Callovo-Oxfordien	toit	$T_{\max} = 35\text{ °C}$ vers 700 - 1 000 ans $T_{10\,000\text{ans}} = 27\text{ °C}$	$T_{\max} = 35\text{ °C}$ vers 1 000 ans $T_{10\,000\text{ans}} = 30\text{ °C}$
		mur	$T_{\max} = 21\text{ °C}$ vers 1 700 ans $T_{10\,000\text{ans}} = 20\text{ °C}$	$T_{\max} = 45\text{ °C}$ vers 500 ans $T_{10\,000\text{ans}} = 31\text{ °C}$
			$T_{\max} = 25\text{ °C}$ vers 1 000 ans $T_{10\,000\text{ans}} = 24\text{ °C}$	$T_{\max} = 45\text{ °C}$ vers 500 ans $T_{10\,000\text{ans}} = 34\text{ °C}$
<b>Durée de la phase thermique*</b>	2 000 ans	50 000 ans	100 000 ans	

\* critère de définition retenu : la température au sein de la zone de stockage  $\leq$  température géothermale initiale + 5°C

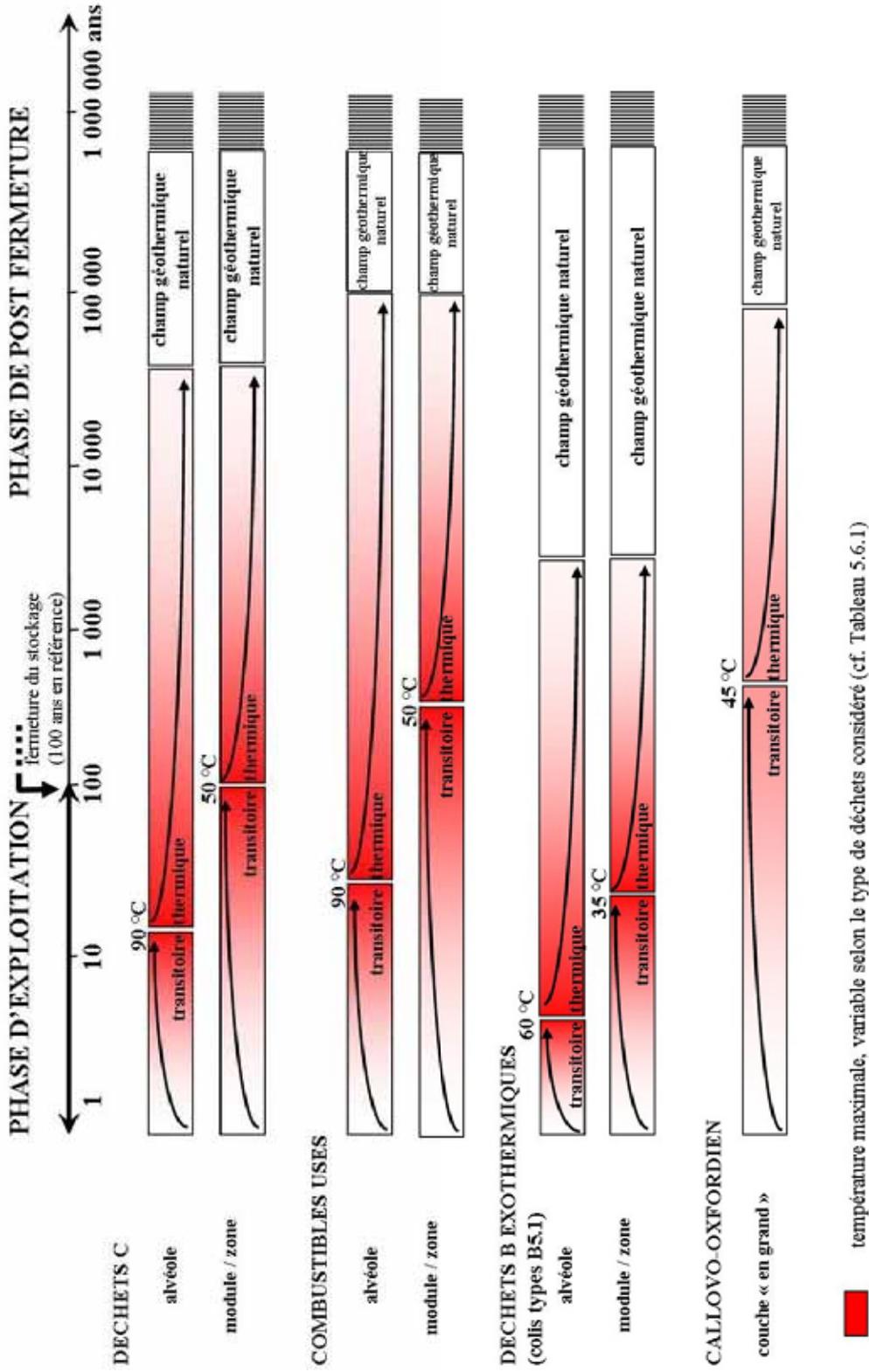


Figure 5.6.1 Chronogramme de la charge thermique des différentes zones de stockage et de la couche de Callovo-Oxfordien « en grand » (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage)

# 6

## Les écoulements et le transfert en solution et sous forme gazeuse

---

6.1	Introduction .....	207
6.2	Le comportement hydraulique des formations encaissantes sous l'effet du stockage.....	213
6.3	Le comportement hydraulique du Callovo-Oxfordien sous l'effet du stockage .....	219
6.4	Synthèse sur les écoulements et le transfert en solution et sous forme gazeuse .....	259



## 6.1 Introduction

### 6.1.1 Les implications des écoulements sur les autres phénomènes

La présence d'eau, sa composition chimique ainsi que sa circulation dans le stockage et dans son environnement ont des conséquences importantes sur les autres processus mis en jeu dans l'évolution phénoménologique.

- Sur le plan chimique, les écoulements déterminent la nature et les extensions spatiale et temporelle des réactions. C'est en particulier le cas de la corrosion des conteneurs métalliques, de l'attaque des bétons, de la dissolution de la matrice verre ou des combustibles usés ainsi que des interactions chimiques entre les matériaux du stockage et la couche du Callovo-Oxfordien, comme par exemple la perturbation alcaline due aux ouvrages en béton.
- De par leurs effets sur les processus chimiques, ils participent à l'évolution mécanique du stockage, en période d'exploitation et d'observation, puis en période post-fermeture. C'est en particulier le cas pour les ouvrages en béton, comme les alvéoles de déchets B, dont les propriétés mécaniques évoluent avec la dégradation chimique du béton.
- *In fine*, ils déterminent le relâchement des radionucléides par les colis de déchets, puis leur transfert depuis les colis de déchets vers la biosphère, dans le stockage, la couche du Callovo-Oxfordien et enfin les formations encaissantes.

### 6.1.2 Les moteurs de l'évolution des écoulements

Avant la réalisation du stockage, les formations géologiques sont à l'équilibre hydraulique. Partant de cet état de référence actuel, l'évolution hydraulique du stockage et de son environnement géologique est due :

- au stockage lui-même,
- à l'évolution géodynamique.

Ce sont principalement les faibles perméabilités et transmissivité du Callovo-Oxfordien qui déterminent les cinétiques et les durées des processus hydrauliques. Les durées des opérations de réalisation et d'exploitation du stockage, des processus thermiques, chimiques, mais aussi mécaniques interviennent dans une moindre mesure. Les effets du stockage sur les écoulements s'inscrivent globalement sur une échelle de temps de l'ordre de la centaine de milliers d'années.

L'évolution géodynamique et ses effets s'étendent sur la durée de l'analyse, soit un million d'années. Ils concernent principalement les formations encaissantes, notamment sus-jacentes, tandis que les effets hydrauliques du stockage restent limités au stockage et à la couche du Callovo-Oxfordien.

### 6.1.3 Une organisation spatiale des processus déterminée par la conception du stockage : indépendance et similitude

Comme pour les processus thermiques, l'architecture compartimentée du stockage, sa gestion progressive et la durée conventionnelle séculaire d'exploitation contribuent à simplifier l'organisation des perturbations hydrauliques liées au stockage et à en limiter les interactions. C'est par exemple le cas pour les zones de stockage qui sont éloignées de plusieurs centaines de mètres. Au sein d'une zone de stockage, les distances entre les modules et entre les alvéoles de stockage permettent des interactions hydrauliques. Cependant, la progressivité de la réalisation des modules conduit à des évolutions hydrauliques similaires entre ces différents ouvrages.

### 6.1.4 La structuration du chapitre

L'ensemble des considérations générales évoquées ci-dessus conduit à décrire l'évolution hydraulique du stockage et du milieu géologique environnant de la manière suivante :

- la présente section traite uniquement de l'évolution hydraulique du stockage et des formations géologiques environnantes, la couche du Callovo-Oxfordien principalement et les encaissants sus-jacents autour des puits. L'évolution hydraulique en grand du milieu géologique, notamment celle des encaissants, sur le prochain million d'années est traitée dans la section portant sur les évolutions géodynamiques ;
- la description est menée d'abord en termes d'écoulement de l'eau et de transfert des gaz. Ensuite, dès lors que le cadre hydraulique a été posé, le transport des solutés dans et autour du stockage pendant toute l'évolution hydraulique est traité ;
- on traite dans un premier temps l'évolution des écoulements dans les encaissants sus-jacents autour des puits et dans un deuxième temps dans le stockage et le Callovo-Oxfordien ;
- dans ce dernier cas, la description des écoulements est d'abord menée à l'échelle globale du stockage (modules, zones) et du Callovo-Oxfordien environnant puis est déclinée de façon spécifique en fonction des ouvrages types (alvéoles de stockage B, C et de combustibles usés) ;
- les processus hydrauliques sont présentés suivant une logique chronologique, en distinguant de manière globale :
  - la décharge hydraulique et la désaturation des formations géologiques autour des ouvrages du stockage pendant la phase d'exploitation,
  - la production de gaz et la resaturation du stockage, et
  - le retour à un nouvel état d'équilibre hydraulique en saturé dans le stockage et dans le Callovo-Oxfordien.

Les effets des processus thermiques, chimiques et mécaniques sur les écoulements sont traités autant que de besoin en indiquant les échelles de temps et d'espace dans lesquelles ils s'inscrivent. En particulier on fait appel à deux processus qui sont décrits plus loin dans le tome.

- Sur le plan mécanique, la formation d'une zone endommagée dans les argilites autour des ouvrages du stockage (dite « EDZ ») (cf. § 8.2) qui présente initialement des perméabilités plus élevées que celles des argilites non perturbées mécaniquement. Son évolution dans le temps joue donc un rôle sur l'évolution hydraulique, aussi bien en terme d'écoulement de l'eau et de transfert des gaz dans et autour du stockage, qu'en terme de transport des solutés.
- Sur le plan chimique, la corrosion des composants métalliques du stockage conduit à la formation d'hydrogène. Les descriptions présentées dans l'Encadré 6.1 permettent d'appréhender les volumes d'hydrogène produits et les temps caractéristiques de ce phénomène.

Dans le cadre de cette description chronologique, une distinction est faite entre d'une part les puits, les galeries et les alvéoles de déchets B, qui sont ventilés durant l'exploitation et, d'autre part, les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés, qui ne le sont pas.

La description du transport des solutés dans et autour du stockage durant l'évolution hydraulique reprend globalement la chronologie suivie dans la description des écoulements et du transfert des gaz. En conclusion, une synthèse dégage les faits marquants de l'évolution hydraulique, nécessaires à la description des évolutions chimique et mécanique, et *in fine* du relâchement et du transfert des radionucléides.

On notera que la description des processus hydrauliques, qui marquent l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique, repose sur les données de terrain, issues pour l'essentiel des forages de reconnaissance sur le site de Meuse / Haute-Marne. Elle résulte également de travaux de modélisation numérique qui permettent d'appréhender les échelles d'espace et de temps qui caractérisent les processus mis en jeu (Encadré 6.2).

**Encadré 6.1****La production d'hydrogène dans le stockage (1/2)**

Dans les conditions anoxiques qui s'établissent au sein du stockage, la corrosion des métaux conduit à la formation d'hydrogène par réduction de l'eau. Quel que soit le scénario de production des déchets considéré, les quantités de gaz formées par d'autres processus comme la radiolyse de l'eau et des composés organiques restent toujours faibles et représentent moins de 10 % de la production totale.

Les métaux se trouvent principalement dans les alvéoles de stockage, comme composants de structure (par exemple, le chemisage des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés), comme conteneurs (par exemple, le surconteneur des colis de déchets C ou le conteneur primaire de nombreux colis primaires de déchets B), ou comme déchets (par exemple les coques et embouts des déchets B5). L'ensemble représente une masse de plusieurs centaines de milliers de tonnes et des surfaces de corrosion de plusieurs centaines de milliers de m<sup>2</sup>. Ces masses et ces surfaces conduisent à la production des volumes d'hydrogène indiqués le tableau ci-dessous.

*Ordre de grandeur des masses de fer, des moles d'hydrogène produites et des volumes occupés dans des conditions physico-chimiques représentatives du stockage, pour une alvéole représentative des différents types de déchets (repris à partir de Talandier, 2005).*

	<b>Masse de fer (kg)</b>	<b>Moles d'Hydrogène produites</b>	<b>Volume d'hydrogène (m<sup>3</sup>)*</b>
<b>Alvéole C0</b>	50 000	1,2·10 <sup>6</sup>	600
<b>Alvéole C1, C2, C3 et C4</b>	28 000	0,6·10 <sup>6</sup>	330
<b>Alvéole de combustibles usés CU1</b>	260 000	6,3·10 <sup>6</sup>	3 100
<b>Alvéole de combustibles usés CU2</b>	110 000	2,6·10 <sup>6</sup>	1 300
<b>Alvéole B</b>	Variables en fonction du type de déchets B		
	de 20 000 à 90 000	de 2,5·10 <sup>6</sup> à 10 <sup>7</sup>	de 1 400 à 5 000

\* : estimation des volumes en considérant une pression de 5 MPa et une température de 30 °C.

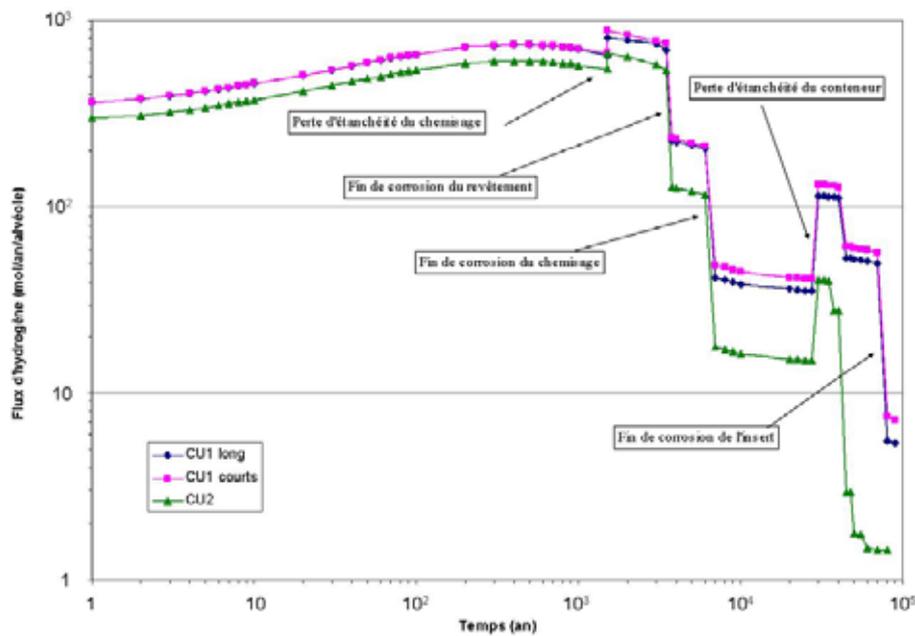
Indépendamment de toute considération sur la présence d'eau et le couplage entre le transfert de l'eau et le transfert de l'H<sub>2</sub>, la cinétique de production de l'hydrogène dépend de la surface offerte à la corrosion et de la cinétique de corrosion.

Compte tenu des différents composants métalliques au sein d'un ouvrage, cette cinétique n'est donc pas constante dans le temps, mais elle varie au fur et à mesure que les composants sont touchés par le phénomène.

### La production d'hydrogène dans le stockage (2/2)

La figure suivante illustre, pour une alvéole de combustibles usés, l'évolution du flux d'hydrogène dans le temps obtenue sur la base d'une vitesse de corrosion de 2 à 3  $\mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$  et en considérant le début de la corrosion dès la fermeture de l'alvéole. Cette figure permet de constater que

- (i) la production d'hydrogène s'étend sur environ 100 000 ans,
- (ii) près de 50 % de l'hydrogène est produit au cours des 4 000 à 5 000 premières années et
- (iii) après cette période, la production décroît globalement d'un ordre de grandeur tous les 10 000 ans. Ces ordres de grandeur de temps et ces proportions se retrouvent également pour les déchets C. Pour les déchets B on retrouve deux périodes, une première période de production intense, jusqu'à 500 ans, puis une période de production plus faible, jusqu'à 100 000 ans.



Représentation schématique de l'évolution du flux de production d' $\text{H}_2$  de corrosion dans le temps au sein d'une alvéole de combustibles usés (extrait de Talandier, 2005)

### Encadré 6.2 La modélisation des phénomènes hydrauliques (1/2)

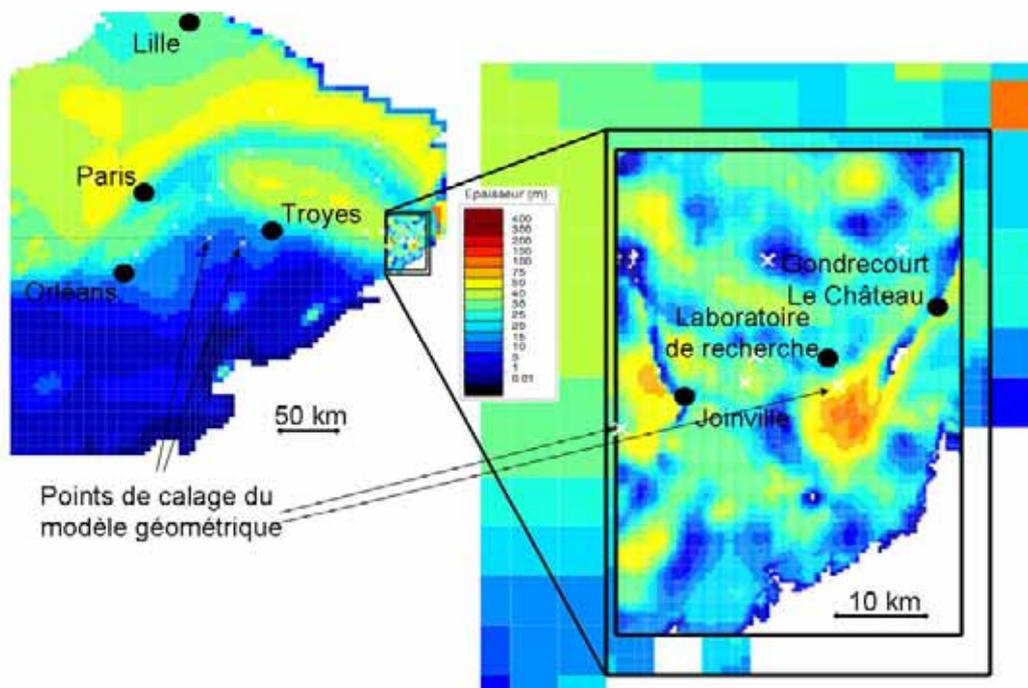
#### Cadre général

La modélisation numérique est un outil classiquement utilisé pour la recherche et l'exploitation des ressources en eau ou en hydrocarbures. Dans le cadre de l'étude de la faisabilité d'un stockage, elle permet d'appréhender a) le comportement d'objets de grande dimension, comme les formations géologiques du site de Meuse / Haute-Marne à l'échelle régionale pluridécakilométrique par exemple, ou d'objets complexes par leur géométrie et/ou leur composition, comme une alvéole de stockage, b) les évolutions aux échelles de temps importantes, comme l'évolution géodynamique dont les effets sur l'hydrogéologie des formations encaissantes couvrent le million d'années, et c) les phénoménologies parfois complexes, comme le couplage entre l'hydraulique et la mécanique ou le couplage entre l'hydraulique et la génération et le transfert de gaz.

#### Exemples de modélisation

Suivant le problème traité, la modélisation numérique met en jeu des outils de calcul spécifiques associés à une représentation plus ou moins complexe des objets concernés. Ceci est illustré sur les figures suivantes relatives à l'étude de deux processus hydrauliques portant l'un sur les écoulements à l'échelle du bassin de Paris jusqu'au secteur de Meuse / Haute-Marne, l'autre sur l'étude de la resaturation d'un ouvrage du stockage (échelle pluridécamétrique).

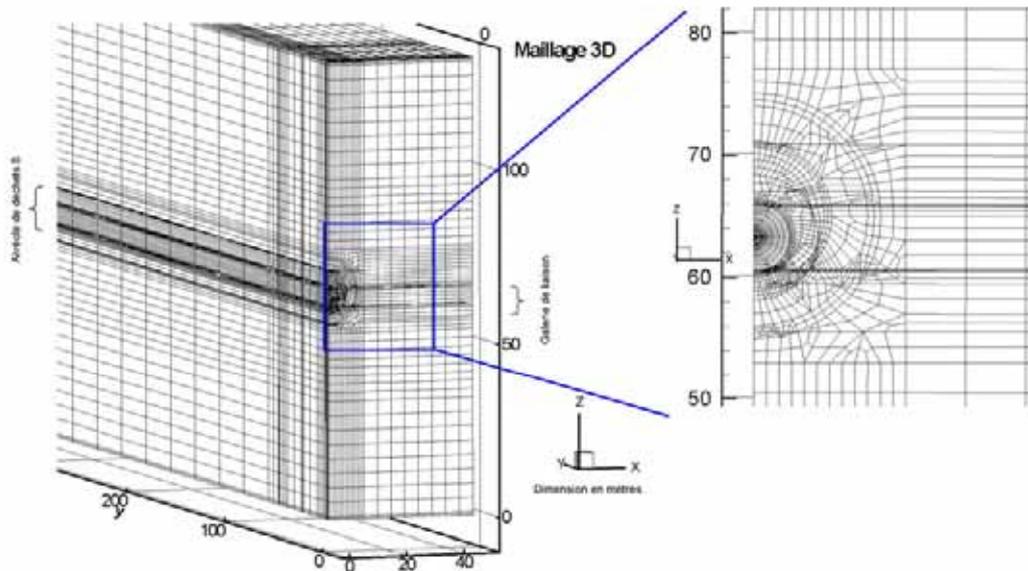
- La figure ci-dessous représente la géométrie 3D retenue pour l'étude des écoulements à l'équilibre actuel dans le Callovo-Oxfordien et les formations encaissantes à l'échelle régionale, soit un maillage de plusieurs millions de mailles pour un objet de quelques kilomètres d'épaisseur et de l'ordre de la centaine de milliers de kilomètres carré de surface (IFP, 2004).



*Extrait du maillage utilisé pour l'estimation numérique des écoulements d'eau à l'actuel, de l'échelle du bassin Parisien à l'échelle du site de Meuse / Haute-Marne : représentation de l'épaisseur du Rauracien supérieur (à partir de IFP, 2004)*

### *La modélisation des phénomènes hydrauliques (2/2)*

- La figure ci-dessous représente le maillage 3D pluridécamétrique pour l'étude des écoulements dans et autour d'une alvéole de déchets B et de sa galerie d'accès, couplée à la production d' $H_2$  de corrosion. L'étude a porté sur une échelle de temps de plusieurs milliers d'années après fermeture de l'alvéole et de la galerie (Colenco Power Engineering, 2004).



*Représentation du maillage utilisé l'estimation numérique des écoulements d'eau et de gaz dans une alvéole de déchets B (à partir de Colenco Power Engineering, 2004)*

## 6.2 Le comportement hydraulique des formations encaissantes sous l'effet du stockage

Du fait de l'architecture générale du stockage et surtout de la très faible perméabilité du Callovo-Oxfordien, l'impact hydraulique du stockage sur les formations encaissantes peut être découplé de celui sur la couche du Callovo-Oxfordien.

Les formations encaissantes sus-jacentes sont une succession de dépôts alternativement aquifères et semi-perméables (Figure 6.2.1), de sorte que leurs interactions hydrauliques sont faibles. Leurs comportements hydrauliques sous l'effet du stockage dépendent de leurs caractéristiques intrinsèques et des dispositions constructives des puits à leur passage (étanchéité ou non étanchéité).

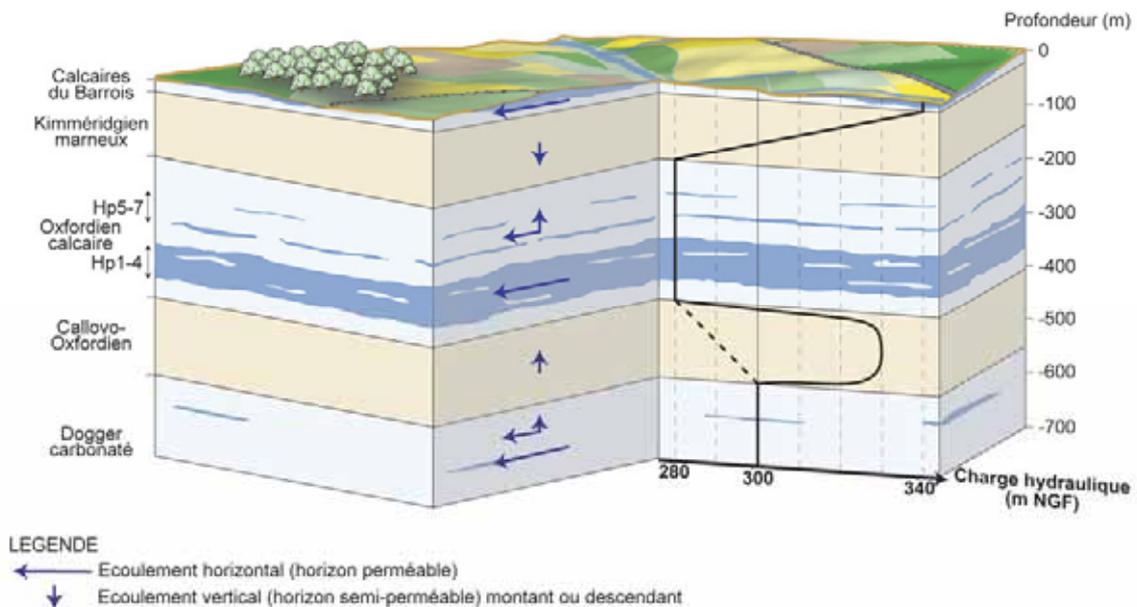


Figure 6.2.1 Schémas des écoulements et du profil de charge initial dans le Callovo-Oxfordien et ses encaissants

### 6.2.1 La décharge hydraulique initiale

Le creusement des puits entraîne une baisse instantanée des pressions hydrauliques dans les formations géologiques traversées au pourtour immédiat des puits (baisse communément appelée « décharge hydraulique »). La paroi des puits est mise instantanément à la pression atmosphérique, c'est-à-dire une pression inférieure à la pression hydraulique initiale dans les formations : de l'ordre de quelques dixièmes de MPa<sup>7</sup> dans les marnes du Kimméridgien et de près de 5 MPa pour les argilites du Callovo-Oxfordien. Dans chaque formation traversée, il apparaît ainsi immédiatement un écoulement radial convergent de la formation vers la paroi du puits. Si celui-ci n'est pas étanché, l'écoulement se poursuit jusqu'à la fin de la période d'exploitation (fermeture du puits avec la mise en place du scellement) tandis que parallèlement, la baisse de pression hydraulique se propage radialement, depuis les parois du puits, au sein de la formation (Figure 6.2.2). Partant de ce schéma général, les caractéristiques hydrauliques spécifiques de chacune des formations encaissantes sus-jacentes et la

<sup>7</sup> Il est d'usage en hydrogéologie d'utiliser comme unité de pression le mètre de colonne d'eau douce. Pour une question de cohérence avec les autres phénoménologies, notamment la géomécanique, les unités du système international sont utilisées dans ce tome. L'ensemble des pressions sera donc exprimé en MPa. Les incertitudes résiduelles sur les valeurs de pression estimées, permettent de faire l'approximation que un MPa correspond à 100 mètres de colonne d'eau douce. Cette approximation permet une conversion aisée entre les deux unités et ne dénature pas les phénomènes décrits.

conception étanche ou non des puits à leur traversée conduisent à des évolutions hydrauliques spécifiques.

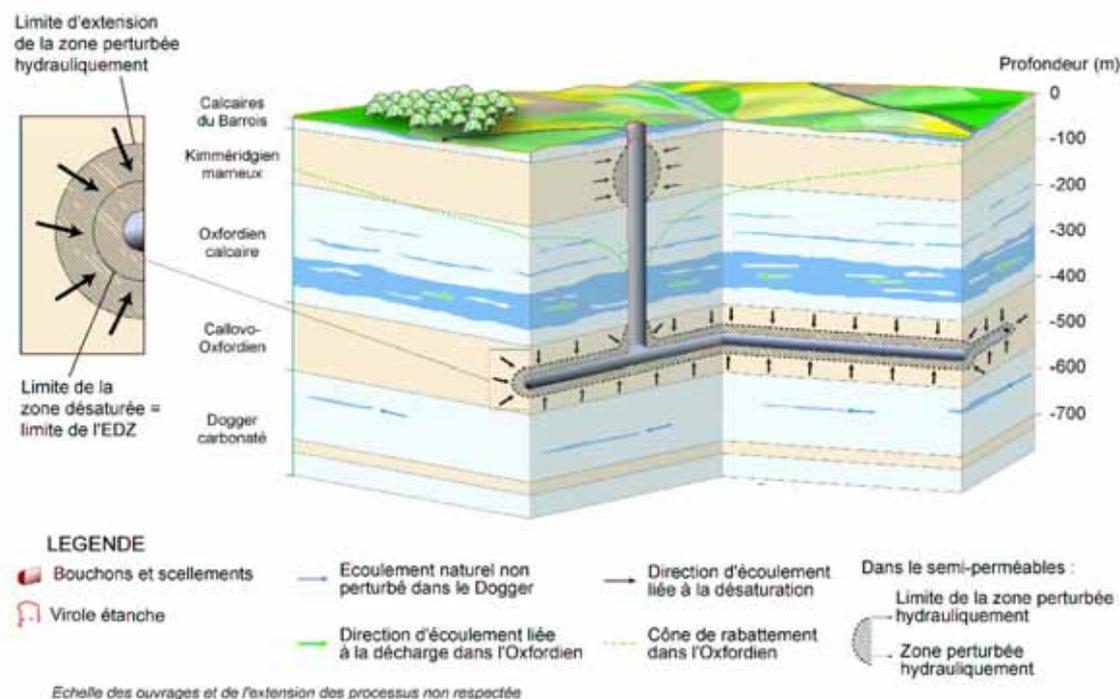


Figure 6.2.2 Schéma des perturbations hydrauliques engendrées par le stockage dans le Callovo-Oxfordien et ses encaissants pendant la phase d'exploitation

## 6.2.2 Le Tithonien : un retour rapide à un équilibre hydraulique

La forte perméabilité des calcaires du Tithonien conduit potentiellement à des venues d'eau importantes (Trouiller & Benabderrahmane, 2005), ce qui amène à envisager de rendre étanches les puits sur toute leur hauteur (soit quelques dizaines de mètres au droit du laboratoire de Meuse / Haute-Marne) au passage du Tithonien. L'étanchéité est réalisée par des viroles métalliques. Avant leur pose, le creusement a une durée trop limitée (quelques mois au plus) pour que l'amplitude de la décharge hydraulique soit importante (la baisse n'est que de quelques centièmes de MPa), ainsi que son extension (quelques dizaines de mètres, voire une centaine de mètres au maximum). L'étanchéité empêche ensuite que la décharge hydraulique ne se propage lors de l'exploitation et le Tithonien retrouve son champ de charge naturel initial autour des puits au bout de quelques mois au maximum après la pose des viroles

## 6.2.3 Le Kimméridgien et l'Oxfordien carbonaté : décharge hydraulique et désaturation

Au passage de ces formations, les puits ne sont pas étanchés, ce qui permet la poursuite de la décharge hydraulique durant toute la phase d'exploitation du stockage (Andra, 2005a, situation G\_0.4). En fonction de la perméabilité de la formation considérée, une éventuelle désaturation peut apparaître au pourtour des puits.

### 6.2.3.1 Le Kimméridgien

La décharge hydraulique se propage autour des puits pendant l'exploitation du stockage, pour atteindre une extension radiale de l'ordre de quelques centaines de mètres en cent ans. La faible perméabilité du Kimméridgien limite aussi les interactions de la décharge hydraulique avec le Tithonien sus-jacent et l'Oxfordien carbonaté sous-jacent. À l'inverse, la décharge hydraulique produite par les puits dans l'Oxfordien carbonaté se transmet progressivement vers le haut et affecte les charges hydrauliques du Kimméridgien en se superposant, en quelques dizaines d'années, à la décharge hydraulique directe des puits. À la fin de la période séculaire d'exploitation, l'extension de la décharge affecte une surface au sol de plusieurs kilomètres de rayon. Les valeurs de la décharge hydraulique sont de l'ordre de quelques dixièmes de MPa à une centaine de mètres des puits et, au-delà de quelques centaines de mètres, inférieures au centième de MPa.

Parallèlement à la décharge hydraulique, les faibles perméabilités des marnes du Kimméridgien permettent leur désaturation autour des puits sous l'effet de l'air de ventilation. Comme pour la décharge hydraulique, cette désaturation se propage radialement aux parois des puits, mais avec des vitesses faibles, de l'ordre du mètre par an durant les premières années, puis de quelques décimètres par an au-delà de 10 ans.

### 6.2.3.2 L'Oxfordien carbonaté

L'Oxfordien carbonaté est constitué d'une alternance d'horizons aux perméabilités contrastées. On dénombre deux séries d'horizons poreux (Hp1-4 et Hp5-7) dont les perméabilités sont de l'ordre de  $10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$  et d'un ordre de grandeur supérieur au reste de la formation (cf. § 3.3.2.2).

L'existence de niveaux moins perméables entre les deux séries d'horizons poreux implique que les décharges hydrauliques de chaque série sont initialement indépendantes (Wendling, 2005). La décharge hydraulique se propage également dans les horizons les moins perméables.

Initialement, la décharge hydraulique dans les horizons poreux est plus importante dans la série supérieure (Hp5 à Hp7) car elle a été traversée la première par les puits. Par la suite, la décharge hydraulique se développe également dans la série d'horizons perméables inférieure (Hp1 à Hp4). À terme elle devient supérieure à celle créée dans les horizons perméables supérieurs.

À des distances d'ordre kilométrique des puits et après plusieurs dizaines d'années d'ouverture, les charges hydrauliques s'homogénéisent sur toute la hauteur de l'Oxfordien carbonaté. En effet, les contrastes de perméabilité entre horizons perméables et horizons moins perméables ne sont pas suffisants pour maintenir des différences de charge significatives à ces échelles d'espace et de temps.

Juste après le creusement, le débit global d'eau venant dans chacun des puits est de plusieurs dizaines de litres par minute. Il diminue en quelques années pour se stabiliser à un niveau quasi stationnaire d'environ une dizaine de litres par minute.

Dans la conception proposée, les puits sont regroupés dans une zone dont l'extension d'ordre kilométrique est limitée par rapport aux distances d'interaction hydraulique dans l'Oxfordien carbonaté. Ainsi, au bout de quelques mois, les perturbations hydrauliques liées à chacun des puits s'influencent mutuellement (Figure 6.2.3). Après plusieurs années, les interactions sont telles que la décharge hydraulique loin des puits peut être assimilée à celle produite par un seul puits central de grand diamètre (de l'ordre d'une centaine de mètres). Au bout d'une dizaine d'années, le front de la décharge hydraulique s'est propagé à plusieurs kilomètres des puits. À ce moment, la décharge hydraulique est supérieure à 1 MPa dans une zone d'extension plurihénométrique autour des puits. Par la suite la cinétique de la propagation de la zone d'influence des puits est ralentie par la présence des affleurements de l'Oxfordien carbonaté qui fournissent un débit suffisant sans perte de charge

significative, car la perméabilité y est plus importante que sous couverture. Le champ de décharge hydraulique devient quasi stationnaire au-delà d'une trentaine d'années.

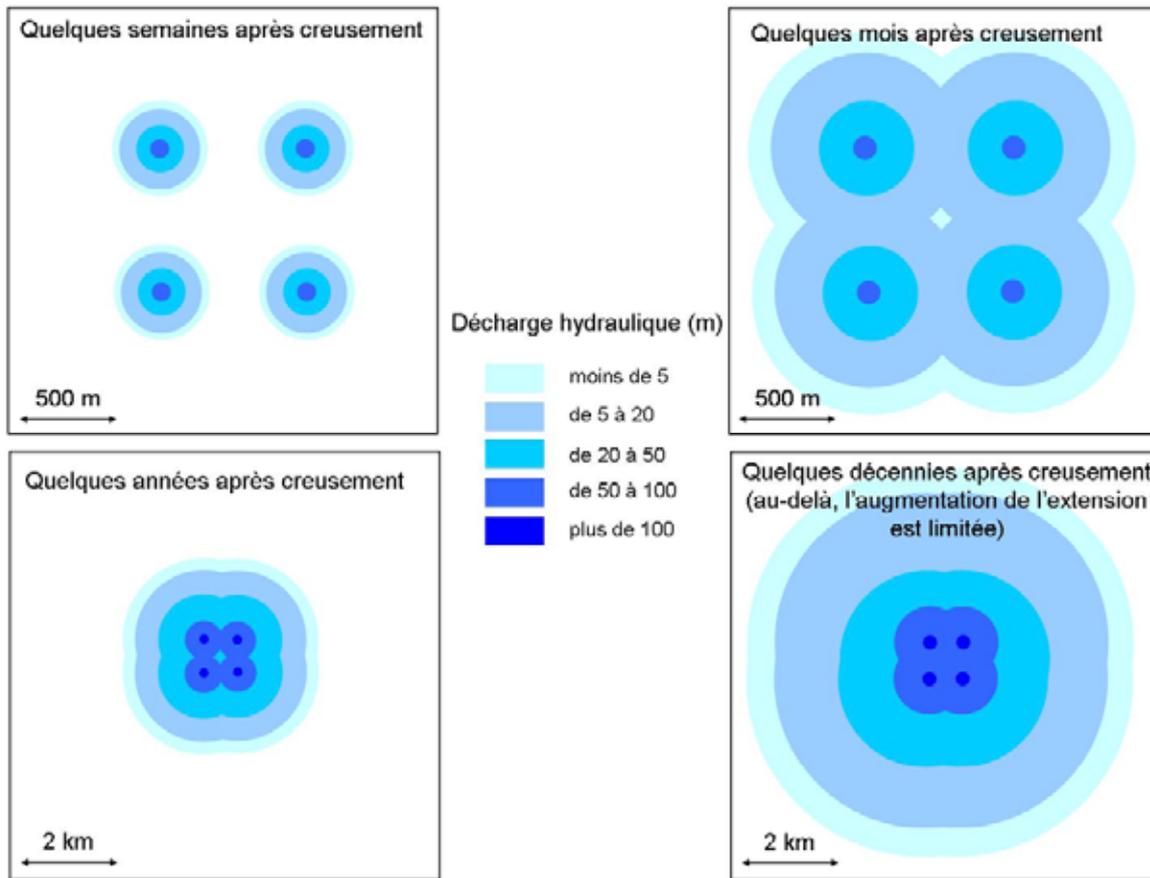


Figure 6.2.3 Représentation schématique de la décharge hydraulique créée par les puits dans l'horizon Hp1-4 de l'Oxfordien carbonaté

On notera que l'Oxfordien carbonaté constitue une condition aux limites hydrauliques pour le toit du Callovo-Oxfordien. Par conséquent, lors de l'ouverture des puits, une décharge hydraulique se produit dans le Callovo-Oxfordien en réaction à la décharge hydraulique dans l'Oxfordien carbonaté. Les perméabilités du Callovo-Oxfordien étant très faibles, la vitesse de propagation verticale de cette décharge hydraulique est très réduite en comparaison de la vitesse d'extension horizontale dans l'Oxfordien carbonaté. Il faut plusieurs centaines d'années pour que la zone en décharge hydraulique atteigne le milieu de la couche du Callovo-Oxfordien et se superpose à la décharge liée au stockage. Toutefois, ce phénomène de superposition n'est sensible que quelques centaines de mètres autour des puits et ne concernerait donc pas les zones de stockage.

**Encadré 6.3      La notion de degré de saturation en eau**

Le degré de saturation en eau désigne la proportion relative de la porosité occupée par l'eau (dans la suite du texte, le degré de saturation pourra être abrégé par l'utilisation de la lettre majuscule S). En théorie, il varie donc entre 100 % : toute la porosité est occupée par de l'eau et on parle alors d'état saturé, à 0 % : le milieu poreux est totalement sec, et on parle alors d'état sec. De manière générale, pour les degrés de saturation en eau strictement inférieurs à 100 %, on parle d'états non saturés du milieu poreux.

Le degré de saturation en eau est généralement déterminé par calcul à partir de la densité sèche du milieu poreux (densité du milieu à l'état sec), de la teneur en eau massique (définie comme le rapport de la masse d'eau sur la masse de solide) et de la densité de grain (densité des solides constituant le milieu poreux). Ces trois paramètres peuvent être déterminés expérimentalement. Toutefois, les argiles sont des milieux poreux divisés, à la structure porale complexe, et constitués de solides différents. La détermination expérimentale de la teneur en eau et de la densité de grain présente alors des incertitudes, de sorte que le degré de saturation en eau ne peut être qu'approché par ce type de calcul.

Le degré de saturation en eau ne rend pas compte de la distribution de l'eau dans les différents pores qui constituent la porosité, ni même de la nature thermodynamique de l'eau (eau libre, eau liée, voire eau de constitution) : il s'agit d'un paramètre macroscopique dont l'utilisation en tant que paramètre des comportements thermique, hydraulique, mécanique et géochimique d'un milieu poreux est parfois délicate. L'ensemble de ces comportements dépend pour partie de la quantité d'eau présente dans la porosité. Ainsi, on parle d'état quasi saturé vis-à-vis d'un comportement donné pour indiquer que même si le milieu poreux n'est pas à la saturation en eau totale théorique ( $S = 100\%$ ), son comportement est pourtant proche de celui à la saturation totale, et peut être assimilé comme tel.

C'est particulièrement le cas pour l'écoulement de l'eau dans les milieux argileux : classiquement on considère qu'au-delà de 95-97 % de degré de saturation en eau, les paramètres hydrauliques de l'eau, notamment la perméabilité et la porosité cinématique, sont quasi identiques à ceux à la saturation totale. Pour des degrés de saturation en eau inférieurs à cette limite, la perméabilité à l'eau diminue progressivement, jusqu'à plusieurs ordres de grandeur lorsque le degré de saturation en eau devient inférieur à 20-30 %.

Pour le comportement mécanique, on peut raisonnablement retenir un seuil similaire d'état quasi saturé. Toutefois, l'évolution des propriétés mécaniques est surtout marquée lorsque le degré de saturation est inférieur à 80 %.

Pour les comportements chimiques, cette notion d'état quasi saturé est plus délicate à définir suivant le processus considéré. Ainsi pour la corrosion des aciers en milieu poreux non saturé et en condition anoxique, on peut retenir que la cinétique de corrosion augmente linéairement avec le degré de saturation en eau du milieu poreux pour atteindre un maximum dès 95-97 %. En revanche, en milieu aéré, on observe un comportement en cloche : la vitesse de corrosion passe par un maximum pour un degré de saturation compris entre 80 et 90 %. Elle diminue de part et d'autre, soit par manque d'eau (degré de saturation inférieur) soit par difficulté de transfert de l'oxygène dans le milieu poreux (degrés de saturation supérieurs).

### 6.2.3.3 Le Dogger calcaire et les formations encaissantes sous-jacentes

Par conception, les formations géologiques sous-jacentes au Callovo-Oxfordien ne sont pas traversées par les puits ou par un autre ouvrage du stockage. La décharge hydraulique engendrée par le stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien se transmet lentement vers le Dogger calcaire, mais la distance de garde de l'ordre de 60 mètres entre le stockage et le toit du Dogger calcaire, limite son extension sur la durée séculaire conventionnelle d'exploitation du stockage. Par ailleurs, en considérant une durée d'ouverture du stockage pluriséculaire, les perméabilités élevées du Dogger calcaire permettent d'amortir tout effet hydraulique provenant du stockage sans que les charges hydrauliques en soient sensiblement affectées. L'ensemble des formations sous-jacentes au Callovo-Oxfordien n'est donc pas affecté par la décharge hydraulique liée au stockage.

### 6.2.4 La fermeture du stockage et le retour à un nouvel équilibre hydraulique

Après la fermeture du stockage (scellement des puits), les écoulements dans les formations sus-jacentes s'organisent pour permettre un retour à un champ de charge hydraulique à l'équilibre avec les conditions aux limites naturelles imposées par les aquifères de surface dans les zones d'affleurements. Du fait de la mise en place de viroles étanches au droit du Tithonien, le retour à l'équilibre hydraulique dans cette formation s'est déjà produit durant la phase d'exploitation, les paragraphes suivants ne traitent donc que le Kimméridgien et l'Oxfordien.

#### 6.2.4.1 Le Kimméridgien

À la fermeture des puits, l'extension de la zone désaturée est de quelques dizaines de mètres autour de chacun des puits. Ces ouvrages étant séparés de plusieurs centaines de mètres l'un de l'autre, il n'y a pas d'interaction hydraulique en terme de désaturation.

La fermeture des puits permet l'enclenchement d'une resaturation progressive de la zone désaturée. Il faut plusieurs milliers d'années pour obtenir une resaturation totale. Ce transitoire de resaturation n'affecte pas les couches géologiques en contact direct avec le Kimméridgien.

L'influence des puits sur l'évolution de la décharge hydraulique n'est sensible qu'à leur voisinage immédiat. Au-delà d'une centaine de mètres des puits, la décharge dans le Kimméridgien est pilotée par la décharge hydraulique dans l'Oxfordien carbonaté.

Dans l'Oxfordien carbonaté, le temps de retour à un nouvel équilibre hydraulique est similaire à la durée de la phase d'exploitation (cf. ci-après). L'influence hydraulique de l'Oxfordien carbonaté sur les charges au mur du Kimméridgien cesse donc une centaine d'années à quelques centaines d'années après la fermeture du stockage. Il faut cependant quelques dizaines d'années supplémentaires pour que ce changement atteigne le toit du Kimméridgien. Quelques centaines d'années après la fermeture, l'influence hydraulique de l'Oxfordien carbonaté sur la décharge dans le Kimméridgien a donc cessé. Seule la décharge hydraulique liée à l'influence directe des puits perdure dans une zone très limitée. Elle est fortement influencée par la désaturation et ne se comble progressivement qu'après quelques milliers d'années supplémentaires.

#### **6.2.4.2 L'Oxfordien carbonaté**

Compte tenu des caractéristiques hydrauliques de l'Oxfordien carbonaté, le temps de retour à l'équilibre hydraulique est du même ordre de grandeur que le temps d'ouverture des puits. Au moment de la fermeture, la décharge hydraulique a atteint un rayon de plusieurs kilomètres. Il y a donc une forte interaction hydraulique entre les différents puits. Le comblement de la décharge hydraulique globale s'effectue radialement à partir de la limite externe de la zone perturbée. Quelques mois avant le retour à l'équilibre hydraulique, le champ de charge est tel que la perturbation hydraulique globale s'individualise autour de chaque puits. La décharge hydraulique associée à chacun de ces ouvrages s'élimine alors progressivement sans interagir avec celles des puits voisins. Après la disparition de la décharge hydraulique dans l'Oxfordien carbonaté, son effet perdure encore quelques dizaines d'années dans le Kimméridgien, et quelques centaines d'années à un millier d'années dans le Callovo-Oxfordien.

#### **6.2.5 L'évolution hydraulique des encaissants après la perturbation hydraulique liée au stockage**

L'influence sur les écoulements de la décharge hydraulique liée aux puits perdure quelques centaines d'années dans l'Oxfordien carbonaté et quelques milliers d'années dans le Kimméridgien. Ces périodes sont courtes comparées aux temps caractéristiques des modifications géomorphologiques liées aux changements climatiques (cf. § 9). Le nouvel état d'équilibre hydraulique est donc très proche de celui à l'état initial notamment en ce qui concerne le schéma général des écoulements dans les formations encaissantes. Par ailleurs, les évolutions géodynamiques (cf. § 9) n'auront d'effet hydraulique significatif qu'après plusieurs centaines de milliers d'années et gouverneront alors l'évolution des écoulements dans les formations encaissantes à l'échelle du site de Meuse / Haute-Marne et de la zone de transposition (cf. § 3).

### **6.3 Le comportement hydraulique du Callovo-Oxfordien sous l'effet du stockage**

#### **6.3.1 La décharge hydraulique et la désaturation durant la phase d'exploitation**

Comme pour les formations encaissantes, la réalisation du stockage se traduit par une décharge hydraulique liée à la mise à la pression atmosphérique des parois des différents ouvrages lors du creusement. En outre, du fait de la très faible perméabilité des argilites du Callovo-Oxfordien, une désaturation liée à un air de ventilation non saturé en vapeur d'eau se propage à partir des parois des excavations vers la roche, mais avec une vitesse d'extension plus limitée que celle de la décharge hydraulique.

##### **6.3.1.1 À l'échelle de la couche en grand**

Compte tenu de la progressivité de la réalisation des différents ouvrages du stockage, la décharge hydraulique dans le Callovo-Oxfordien concerne d'abord les puits, puis l'ensemble des galeries de liaison principales et enfin les zones de stockage. Elle est donc précoce pour les puits et plus tardive pour les alvéoles des déchets C et les alvéoles de combustibles usés. La décharge hydraulique à l'échelle du stockage est donc progressive. Les ouvrages du stockage n'étant pas étanchés au niveau du Callovo-Oxfordien, elle peut se propager tant que ceux-ci restent ouverts.

Ainsi que le décrit la section sur la mécanique (cf. § 8), le déconfinement mécanique des argilites autour des ouvrages crée, lors de leur creusement, une zone endommagée initiale (cf. § 8.2) dont la perméabilité est plus élevée que celle des argilites non perturbées (Altmann & Coelho, 2005 ; Ozanam & Su, 2004). Cette zone endommagée influence la décharge hydraulique qui s'y propage rapidement

jusqu'aux argilites non perturbées. Au delà de la zone endommagée, la vitesse de propagation de la décharge hydraulique est faible.

Dans l'hypothèse d'une anisotropie de perméabilité ( $K_h = 10 K_v$ ) au sein des argilites non endommagées mécaniquement, l'extension de la décharge hydraulique du stockage serait différente entre l'horizontale et la verticale.

- Sur la verticale, pour une durée d'exploitation conventionnelle séculaire, la décharge hydraulique n'atteindrait pas le toit et le mur du Callovo-Oxfordien. À quelques centaines de mètres autour des puits, là où la décharge hydraulique créée dans l'Oxfordien carbonaté se propage vers le bas dans la couche du Callovo-Oxfordien, les deux décharges hydrauliques sont susceptibles de se superposer au bout de 100 à 200 ans. Au centre de la couche cette superposition produirait une dépression totale plus élevée d'à peine quelques centièmes de MPa par rapport à celles créées par les deux décharges hydrauliques prises individuellement.
- Sur l'horizontale, l'extension du front de décharge hydraulique est plus rapide : elle se propage de 50 à 60 m en une centaine d'années.

À l'échelle de la couche du Callovo-Oxfordien, la décharge hydraulique interagit avec la surpression, initiale dont l'origine est attribuée à un phénomène assimilable à de l'osmose chimique (cf. § 3 sur l'état initial). En régime hydraulique établi, ce qui est le cas dans le Callovo-Oxfordien, ce phénomène ne crée pas de flux d'eau, les surpressions sont stables dans le temps et identiques sur la quasi-totalité de l'épaisseur du Callovo-Oxfordien. Elles sont liées à la concentration en solutés dans les eaux du Callovo-Oxfordien et à la composition minéralogique de la roche. La décharge hydraulique met en jeu des flux d'eau qui ne sont pas suffisants pour modifier la chimie de l'eau interstitielle à l'échelle de la couche et perturber l'équilibre chimique et donc l'équilibre osmotique. La décharge hydraulique liée au stockage se propage donc sans influencer la surpression osmotique.

### 6.3.1.2 À l'échelle du stockage

Les différentes zones de stockage sont éloignées les unes des autres de plusieurs centaines de mètres, de sorte que leurs décharges hydrauliques propres n'interagissent pas entre elles durant la durée séculaire d'exploitation. Chaque zone de stockage est donc hydrauliquement indépendante.

La description générale de l'évolution de la désaturation au sein du Callovo-Oxfordien se décline en fonction du type d'ouvrage. Pour les ouvrages ventilés (galeries et alvéoles de déchets B), on traite explicitement de la phase d'exploitation. En revanche, pour les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés qui ne sont pas ventilées, la mise en place des capots d'étanchéité quelques années après leur réalisation limite la propagation horizontale de la décharge hydraulique à quelques mètres et permet d'initier la resaturation. Il n'est donc pas nécessaire de traiter explicitement de cette phase. L'évolution de leur transitoire hydraulique sera, en revanche, traitée dans la description de la phase de postfermeture (§ 6.3.2)

Pour les alvéoles de déchets B, une légère interaction hydraulique entre deux alvéoles voisines est possible dans le cas où elles seraient maintenues ventilées pendant quelques dizaines d'années. Elle est toutefois négligeable.

Entre deux galeries de liaison, les interactions hydrauliques sont plus importantes avec des durées d'ouverture de l'ordre d'une centaine d'années. Au plus fort de l'interaction hydraulique, les décharges sont de quelques 0,01 MPa à quelques 0,1 MPa. Ces valeurs sont faibles en comparaison de la pression hydraulique initiale avant creusement (environ 5 MPa). Avec une exploitation du stockage sur des durées pluriséculaires, les interactions hydrauliques entre ouvrages sont plus importantes, mais restent faibles, de l'ordre de quelques dixièmes de MPa.

### 6.3.1.3 La désaturation dans les ouvrages ventilés : puits, galeries et alvéoles de déchets B

Les puits, les galeries et les alvéoles de déchets B sont ventilés durant toute la durée de leur exploitation par un air qui n'est pas saturé en vapeur d'eau. Dès lors, il impose des pressions d'eau négatives en paroi des ouvrages (communément appelées succions) (Encadré.6.4). En raison de la faible perméabilité des argilites, les débits d'air et les importantes succions ainsi créées peuvent conduire à leur désaturation au pourtour immédiat des ouvrages.

#### ● L'hygrométrie de l'air de ventilation au sein du stockage

Du fait de la longueur importante des galeries, l'hygrométrie relative de l'air de ventilation varie en fonction de la position au sein du stockage (Wendling, 2005).

Sur le site de Meuse / Haute-Marne, l'hygrométrie relative de l'air varie de 75 % en été pour une température moyenne de 17 °C (cela correspond à environ 11 g de vapeur d'eau par kg d'air ou encore à une pression partielle de vapeur d'eau d'environ 1 700 Pa) à 84 % en hiver pour une température moyenne de 3 °C (soit 4 g.kg<sup>-1</sup> ou 600 Pa). En moyenne sur l'année, l'hygrométrie relative de l'air est de 80 % et la température moyenne de 10 °C (soit 7 g.kg<sup>-1</sup> ou 1 100 Pa) (cf. § 3.5.1).

Au cours de sa descente dans les puits, les conditions hydriques de l'air de ventilation évoluent sous l'influence de deux facteurs :

- la température des formations géologiques qui augmente avec la profondeur pour atteindre 22-23 °C au centre de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- les apports ou pertes d'eau le long des parois, notamment lors du passage dans l'Oxfordien carbonaté dont les perméabilités sont relativement fortes.

De fait, en moyenne sur l'année, les paramètres hydriques de l'air de ventilation au pied des puits correspondent à une hygrométrie relative de 90 % pour une température de 12 °C (soit 8,5 g.kg<sup>-1</sup> ou 1 300 Pa) (Figure 6.3.1).

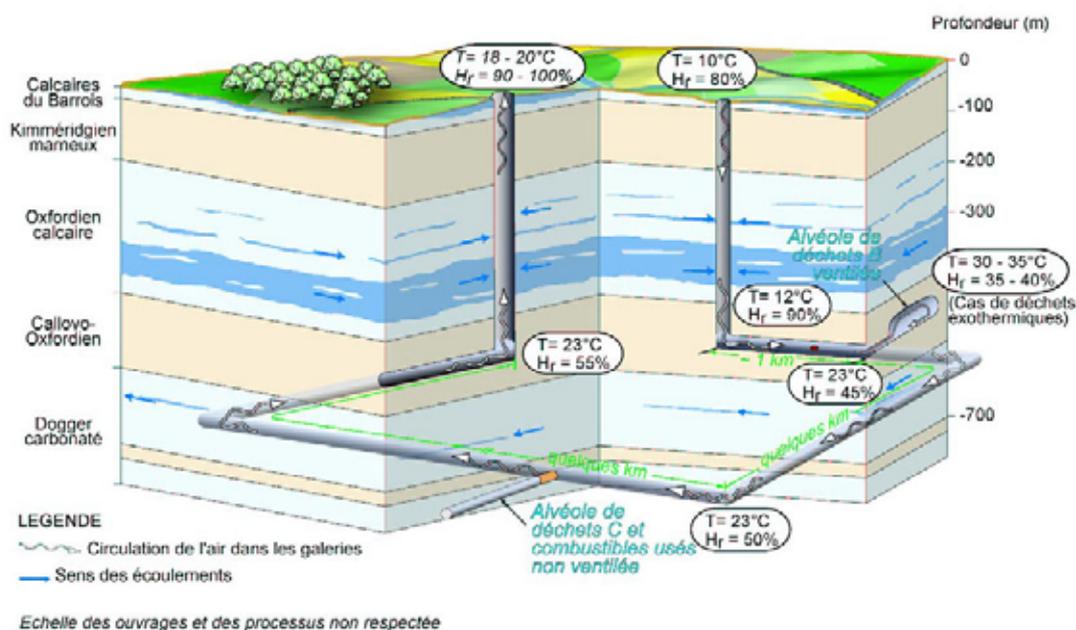


Figure 6.3.1 Représentation de l'évolution de la température et de l'hygrométrie relative de l'air le long d'un circuit de ventilation schématisé à l'échelle du stockage

Une fois arrivé en bas des puits, l'air continue à circuler le long des galeries. Les paramètres hydriques de l'air de ventilation évoluent progressivement au fur et à mesure que l'on s'éloigne des puits, principalement par équilibre avec la température géothermale naturelle de 22-23 °C. Cet équilibre est atteint après 1 km environ et l'hygrométrie relative moyenne sur l'année est alors proche de 50 % (soit 13,5 g.kg<sup>-1</sup> ou 2 100 Pa). Au-delà, sur des distances de parcours plus importantes (plusieurs kilomètres au moins), l'hygrométrie peut augmenter de quelques % du fait des apports d'eau par le Callovo-Oxfordien depuis les parois des galeries (de l'ordre de 10<sup>-11</sup> m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> par mètre linéaire de galerie).

À la base des puits de retour d'air, l'hygrométrie relative de l'air peut être assimilée à celle d'une galerie de liaison, soit environ 50 % à 55 %. Durant la remontée et en moyenne sur l'année, la température de l'air baisse. Couplée aux apports d'eau par les parois, cette baisse de température implique une augmentation importante de l'hygrométrie relative de l'air. En moyenne sur l'année et lors de son arrivée en surface, l'air expulsé par le stockage a une hygrométrie relative proche de 90 % à 100 % et une température avoisinant 19 °C.

Dans les alvéoles de déchets B exothermiques et ventilées, la température de l'air de ventilation peut atteindre environ 50 °C. Son hygrométrie peut alors descendre en dessous de 50 %. La longueur de ces alvéoles (270 m environ) étant plus faible que la longueur nécessaire à la mise en place d'un régime thermique établi (longueur estimée à un kilomètre, par analogie avec les galeries), l'hygrométrie relative de l'air varie au sein des alvéoles et sa valeur avoisine alors les 40 % au fond des alvéoles de déchets B exothermiques.

Les variations annuelles de l'hygrométrie relative de l'air de surface influent sur les conditions hydriques de l'air au sein du stockage. Cependant, sur la durée d'exploitation du stockage, une hygrométrie moyenne annuelle permet de rendre compte du comportement. Les variations saisonnières n'affectent que des épaisseurs d'extension décimétrique au sein des argilites depuis la paroi des ouvrages ventilés.

À partir de ce schéma global, on peut donc distinguer schématiquement cinq configurations types :

- les puits par lesquels l'air arrive et dans lesquels l'air de ventilation est proche de la saturation,
- les quelques premières centaines de mètres de galeries, zone transitoire dans laquelle les variations d'hygrométrie sont importantes,
- les galeries situées loin des puits et les alvéoles de déchets B ventilées dont l'hygrométrie de l'air est faible et constante pendant la période de ventilation,
- les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés qui ne sont pas ventilées dès la mise en place des colis et n'échangent pas d'air avec les galeries du fait de la présence du capot d'étanchéité,

les puits de retour d'air pour lesquels l'air est sec en bas et fortement chargé en humidité au niveau de la surface.

**Encadré.6.4 L'hygrométrie relative de l'air et la succion d'un milieu poreux en équilibre**

**L'hygrométrie de l'air**

L'hygrométrie de l'air (*i.e.* humidité de l'air) traduit la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. Pour une température et une pression totale d'air données elle est exprimée en  $\text{g.m}^{-3}$  d'air ou en  $\text{g.kg}^{-1}$  d'air. Toutefois, on utilise plus généralement la notion d'hygrométrie relative qui est le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau sur la pression de vapeur saturante aux température et pression considérées. La pression de vapeur saturante correspond à la pression de vapeur d'eau au-delà de laquelle l'eau ne peut plus être maintenue sous forme vapeur dans l'air et se condense. La notion d'hygrométrie relative est généralement utilisée dans l'air, mais elle est indépendante de la composition du gaz contenant la vapeur d'eau.

À la pression atmosphérique (environ  $10^5$  Pa ou environ 10 m de colonne d'eau), la pression de vapeur saturante dans l'air est de 600 Pa à  $0^\circ\text{C}$ , 1 200 Pa à  $10^\circ\text{C}$  et 2 400 Pa à  $20^\circ\text{C}$  (Lide, 2002).

**La pression capillaire d'un milieu poreux à l'équilibre avec une atmosphère à humidité relative donnée**

Dans un milieu poreux partiellement saturé en eau, il existe des interfaces entre l'eau et l'air. De part et d'autre de ces interfaces, la pression n'est pas la même. On appelle pression capillaire cette différence de pression :

$$P_{\text{capillaire}} = P_{\text{air}} - P_{\text{eau}}$$

L'hygrométrie relative (*i.e.* humidité relative) de l'air est la variable principale qui permet de déterminer, via la loi de Kelvin (Wendling, 2005), la pression capillaire en parois d'un milieu poreux à l'équilibre avec cet air. La loi de Kelvin stipule que :

$$P_c = -\frac{RT\rho_w}{M}\ln(H_r)$$

Avec

$P_c$  : pression capillaire en parois de galerie (Pa)

$\rho_w$  : masse volumique de l'eau ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

R : constante des gaz parfaits :  $8.3 \text{ (J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1})$

M : masse molaire de l'eau ( $\text{kg.mol}^{-1}$ )

T : température (K)

$H_r$  : hygrométrie relative de l'air (-)

Lorsque l'hygrométrie relative de l'air est très inférieure à 100 %, la pression capillaire peut être très élevée (plusieurs MPa). Si l'air est à la pression atmosphérique (environ 0.1 MPa), cela implique que la pression de l'eau est (fortement) négative. On parle alors de succion de l'eau.

Les implications hydrauliques d'une forte pression capillaire sur la saturation des milieux sont développées dans l'Encadré 6.5.

### ● La description générale du processus de désaturation-resaturation

Ces conditions aux limites en succion imposées par l'air de ventilation induisent une désaturation progressive des matériaux présents dans ces ouvrages et des argilites en champ proche (Encadré 6.3). Cette désaturation dans les argilites se produit en parallèle au processus de décharge hydraulique. Le processus général à l'échelle d'un ouvrage est illustré par les différents schémas de la Figure 6.3.2 :

- **avant creusement**, les flux d'eau sont verticaux suivant le gradient imposé par les encaissements de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- **immédiatement après creusement**, une EDZ liée à la perturbation mécanique se forme. La mise à la pression atmosphérique des parois des excavations induit une décharge hydraulique qui se propage dans le milieu et engendre un flux d'eau convergent vers les ouvrages de stockage dont l'intensité est faible comparée à celle des flux générés par la désaturation ;
- **durant l'exploitation des ouvrages ventilés**, les argilites à leur pourtour se désaturent sous l'effet des échanges hydriques avec l'air de ventilation. L'extension de la zone désaturée croît durant toute la phase d'ouverture des excavations, bien qu'en une dizaine d'années un pseudo état d'équilibre s'installe. Au-delà, la vitesse d'extension de la zone désaturée devient très faible. Les profils de degré de saturation dans le béton de soutènement ou de revêtement et dans les argilites dépendent de la succion imposée par l'air de ventilation mais également de la structure de la porosité et de la perméabilité de chacun de ces milieux poreux (Encadré 6.5). La désaturation crée des flux d'eau convergents vers les ouvrages qui décroissent progressivement dans le temps. Ces flux sont de plusieurs ordres de grandeur supérieurs aux flux en conditions saturées mais restent faibles (de l'ordre de  $10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  par  $\text{m}^2$  de surface de paroi en conditions désaturées maximales, contre environ  $10^{-14} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  par  $\text{m}^2$  de surface de paroi après retour à l'équilibre hydraulique).

À la fin de la période d'exploitation, dans les galeries, le béton de soutènement et la zone fracturée de l'EDZ sont fortement désaturés ( $10\% < S < 30\%$ ). Au-delà, le degré de saturation croît rapidement pour atteindre en limite de la zone microfissurée de l'EDZ une valeur supérieure à 90 %. Les argilites saines sont peu affectées par la désaturation et gardent un degré de saturation supérieur à 97 % au contact de la zone microfissurée. Dans les alvéoles de déchets B, on retrouve une organisation des profils de désaturation similaire, mais avec des extensions proportionnelles au diamètre de ces ouvrages et de l'EDZ associée ;

- **après fermeture**, et notamment après le remblayage des galeries, la resaturation globale des argilites en champ proche et des ouvrages de stockage (principalement galeries et alvéoles de déchets B) s'initie. Elle est influencée par la production d'hydrogène issu de la corrosion des composants métalliques qui, pendant une période transitoire d'une dizaine de milliers d'années au maximum crée des écoulements d'eau divergents du stockage vers le milieu géologique. Ensuite, les écoulements redeviennent globalement convergents. À ce moment, les argilites ont retrouvé un état proche de la saturation totale ( $S > 97\%$  dans l'EDZ ;  $S > 99\%$  dans les argilites saines). Il faut une centaine de milliers d'années pour que les galeries remblayées atteignent un degré de saturation supérieur à 90 %. L'état quasi saturé ( $S > 97\%$ ) est atteint dans les galeries lorsque la totalité de l'hydrogène produit s'est dissoute, soit environ 200 000 ans après fermeture. L'atteinte de la saturation s'accompagne d'un **retour à l'équilibre hydraulique** dans le stockage et dans le Callovo-Oxfordien environnant. Les écoulements sont alors déterminés par les conditions hydrauliques naturelles et par les perméabilités des composants du stockage, notamment celle des scellements.

Les distances entre ouvrages sont telles que les zones désaturées en parois de chacun d'eux n'interagissent jamais entre elles.

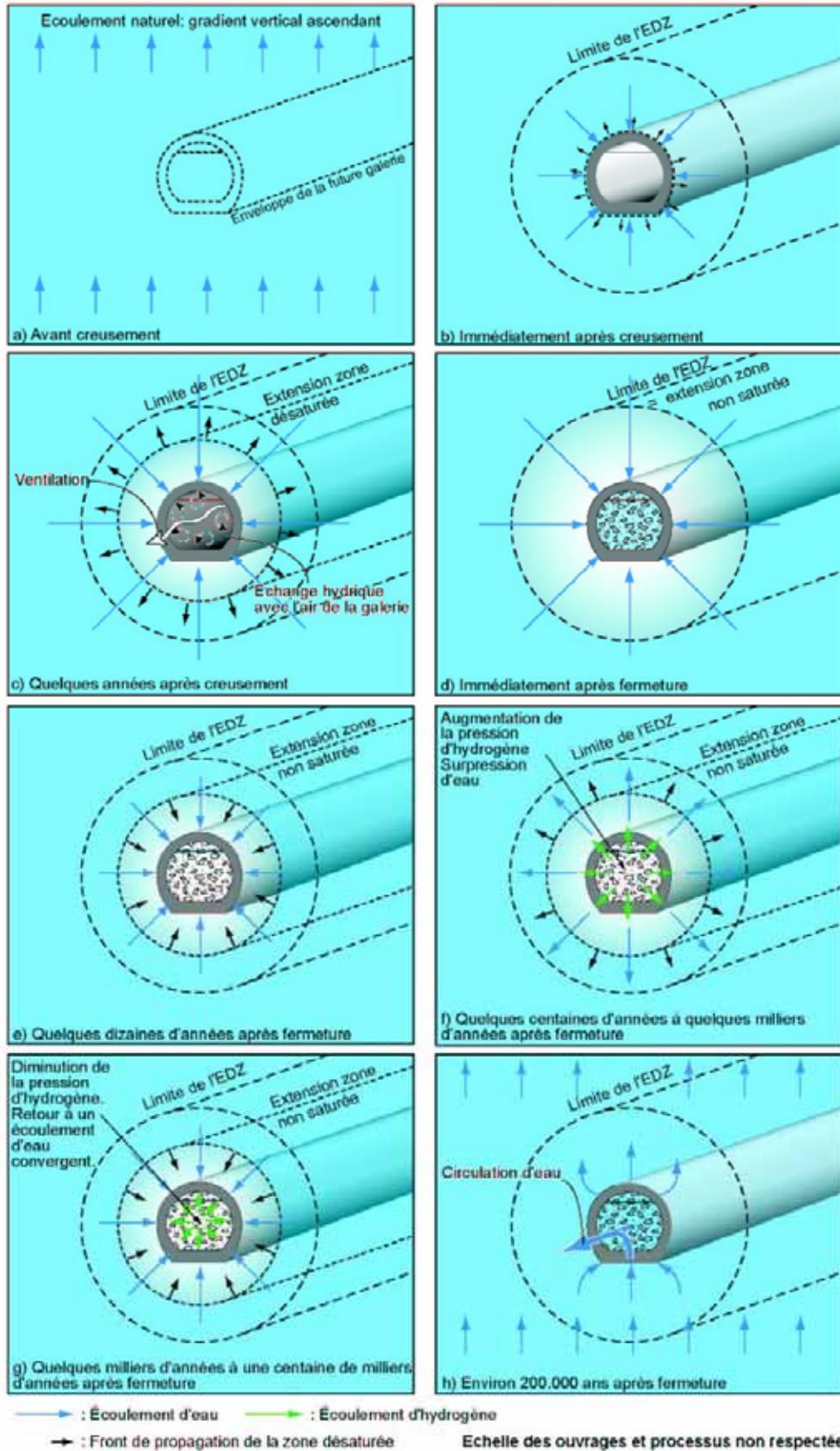
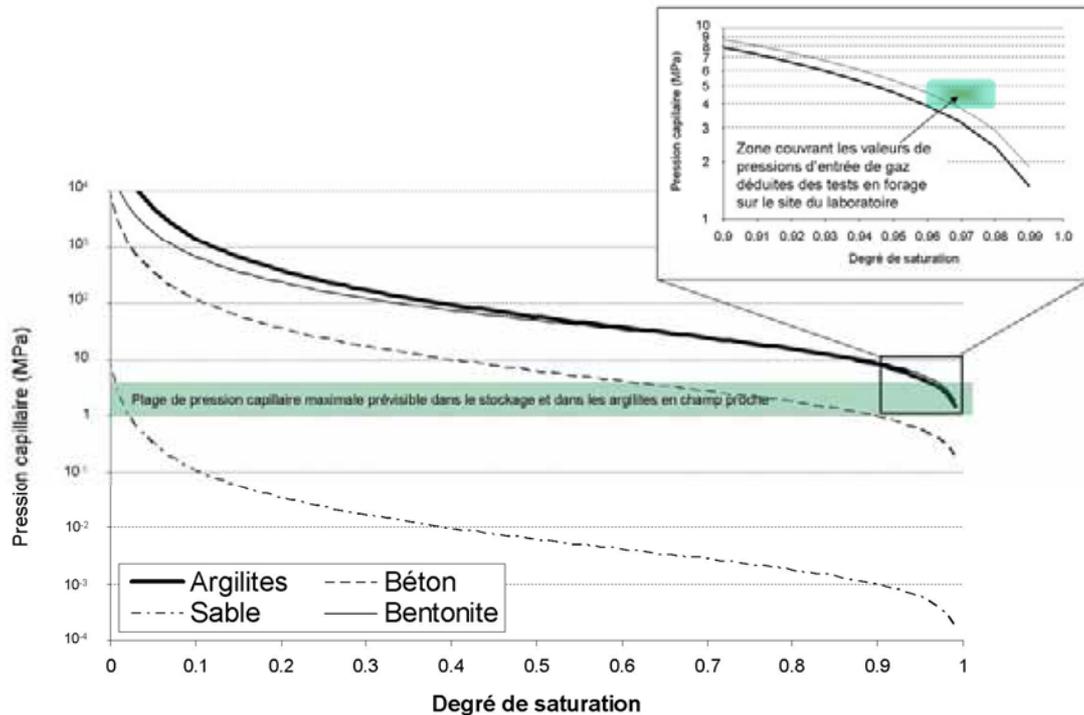


Figure 6.3.2 Schéma général du processus de désaturation lié à la ventilation en phase d'exploitation et à la génération d'hydrogène en phase de postfermeture (Dimensions des ouvrages et importance des phénomènes non respectées)

*Encadré 6.5 Les courbes sorption - désorption des milieux poreux*

Les courbes de sorption-désorption (appelées aussi communément « courbes de pression capillaire » ou « courbes de rétention ») traduisent l'affinité de l'eau vis-à-vis du squelette solide constituant le milieu poreux. Par rapport à d'autres milieux poreux, les argiles présentent généralement une particularité qui tient à ce que l'adsorption d'eau sur les solides modifie l'arrangement du squelette solide. Ainsi, l'organisation de la porosité varie avec la teneur en eau. La figure ci-dessous présente les courbes de sorption-désorption de quatre milieux poreux types : les argilites du Callovo-Oxfordien, une bentonite (argile gonflante), un béton et un sable.



*Courbe de sorption-désorption (pression capillaire fonction du degré de saturation) dans différents milieux poreux. Zoom pour des degrés de saturation supérieurs à 90 % montrant la zone couverte par les mesures de pressions d'entrée de gaz déduites des tests en forage sur le site du laboratoire de Meuse / Haute-Marne.*

La forme de ces courbes permet de dégager un élément important pour la compréhension du transfert de l'eau et des gaz dans ces divers milieux poreux. Les argiles présentent une (très) forte affinité vis-à-vis de l'eau. Cela signifie qu'elles conservent de l'eau en quantité importante même pour des succions très élevées (*i.e.* humidités relatives faibles). En pratique, il faut donc imposer des humidités relatives faibles pour que les argiles commencent à se désaturer. À l'inverse, un sable est déjà fortement désaturé pour des humidités relatives élevées (*i.e.* succions faibles). Les pressions capillaires nécessaires pour aboutir à un début de désaturation des argilites ou des bentonites (argile gonflante) sont de l'ordre de quelques MPa. C'est également cette plage de valeurs qui est envisageable dans le stockage (Talandier, 2005). Cela signifie donc que, dans ce domaine de pression, l'hydrogène gazeux produit dans le stockage ne peut pas désaturer de manière significative les argilites ou une argile gonflante ( $S > 97\%$ ).

Les courbes de sorption-désorption présentent deux zones de courbure, l'une aux alentours de la saturation totale en eau ( $S > 90\%$ ) qui correspond au domaine de pression d'entrée de gaz et l'autre pour des degrés de saturation en eau beaucoup plus faibles ( $S < 20\%$ ) correspondant à la disparition progressive de l'eau externe.

**Encadré 6.6 Les pressions d'entrée de gaz des milieux poreux****Définition**

La pression d'entrée de gaz d'un milieu poreux est définie comme la pression nécessaire pour vaincre les forces capillaires liant l'eau au squelette minéral constituant ce milieu poreux, et permettre la pénétration du gaz dans la porosité du milieu initialement saturé. L'intensité de ces forces capillaires dépend de la taille des pores et elle est d'autant plus importante que les pores sont de petite taille. La pression d'entrée de gaz est définie en référence pour une pression de l'eau interstitielle dans le milieu poreux saturé correspondant à la pression atmosphérique. Lorsque l'eau interstitielle du milieu poreux est sous pression, la pression effective nécessaire pour qu'un gaz puisse pénétrer dans le milieu poreux est égale à la somme de la pression d'entrée de gaz et de la pression de l'eau.

Les milieux poreux peuvent présenter une distribution de tailles de pores. Dès lors, en toute rigueur et indépendamment de toute considération sur la connectivité des différents pores, la pression d'entrée de gaz correspond à celle des pores de plus grande taille.

**Caractéristiques des argilites du Callovo-Oxfordien**

Les essais d'injection de gaz réalisés en forage sur le site du laboratoire de Meuse / Haute-Marne indiquent une pression d'entrée de gaz de l'ordre de 2 à 3 MPa pouvant correspondre à la zone endommagée à la périphérie du forage, et de 4 à 5 MPa pour les argilites saines. Dans ces essais, on ne dispose pas de mesures directes permettant d'apprécier la quantité de gaz qui a pénétré les argilites et donc du degré de saturation atteint. Néanmoins, les valeurs obtenues lors de ces essais en forage ainsi que celles déterminées sur échantillons, permettent de caler le profil de la courbe de sorption-désorption, dont la zone de courbure autour de la saturation en eau se situe à une pression capillaire de quelques MPa.

Ces données expérimentales donnent les mêmes ordres de grandeur que les calculs théoriques de pression d'entrée de gaz dans des pores de taille comprise entre quelques nm et quelques dizaines de nm, à partir de la loi de Jurin. Cette loi donne la pression capillaire en fonction de la tension superficielle à l'interface liquide – solide - gaz et de la taille du pore (assimilé à un cylindre).

Les argilites du Callovo-Oxfordien présentent une distribution de tailles de pore comprise entre quelques nm et 100 nm avec une moyenne autour de 20 nm. Lors des différents essais d'injection de gaz, il est fort probable que le gaz pénètre dans les pores de plus grande taille des argilites et donc à des pressions inférieures aux valeurs seuils indiquées ci-dessus comme le suggère la courbe de sorption-désorption. Compte tenu de la contribution limitée des pores de grande taille à la porosité totale des argilites, les quantités de gaz mises en jeu sont très faibles et donc difficilement mesurables expérimentalement.

**Application à la modélisation du transfert biphasique du gaz**

Cette dépendance de la valeur de la pression d'entrée de gaz à l'organisation de la porosité d'un milieu poreux conduit généralement à ne pas retenir dans les modélisations du transfert biphasique une valeur seuil mais à utiliser la courbe de sorption – désorption de manière continue avec un premier domaine de courbure cohérent avec les mesures expérimentales de pression d'entrée de gaz. Depuis la saturation totale en eau, la courbe de sorption - désorption rend donc compte de manière continue (sans seuil) de la pénétration du gaz même à de faibles pressions (inférieures au MPa) mais avec des degrés de saturation en eau supérieurs à 97 % correspondant à la fraction de gaz qui pénètre dans les macropores.

C'est cette démarche qui a été retenue dans les modélisations venant en appui de la description du transfert de gaz présentée dans les paragraphes qui suivent. Avec cette démarche, un gaz peut rentrer dans les argilites dès que sa pression dépasse la pression hydrostatique de 5 MPa dans la couche du Callovo-Oxfordien à l'équilibre. Dans les argilites en champ proche des ouvrages, les pressions de l'eau interstitielle peuvent être très inférieures à 5 MPa du fait de la décharge hydraulique, de sorte que le gaz pourrait y rentrer à des pressions inférieures jusqu'à la pression atmosphérique. Toutefois, les seuils demeurent des points de repère commodes pour apprécier les effets possibles de certaines pressions de gaz et les mécanismes de transport associés.

## ● Les galeries et les puits

Avant que le processus de désaturation ne soit complètement engagé, on notera l'existence d'un court transitoire de quelques semaines à quelques mois lié au béton de soutènement. En effet, celui-ci est mis en place sous forme de béton projeté (avec une saturation proche de 100 %). Il ralentit le processus de désaturation dans les argilites jusqu'à ce qu'il ait pris et que sa saturation se soit équilibrée avec les conditions hydriques imposées sur sa surface externe par l'air de ventilation.

L'extension et l'ampleur de la désaturation sont similaires pour l'ensemble des galeries, qu'elles soient d'accès ou de liaison.

Au bout d'une année environ, l'extension de la désaturation atteint la limite de la zone fracturée de l'EDZ. Sa propagation dans la zone microfissurée est alors ralentie en raison de la perméabilité plus faible de cette dernière (environ  $5 \cdot 10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$  contre  $5 \cdot 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$  dans la zone fracturée). Il faut alors quelques années pour que l'extension de la zone désaturée atteigne ensuite la limite externe de la zone endommagée. Sa propagation dans les argilites saines est encore plus lente, car leur perméabilité est bien plus faible (de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-14}$  à  $5 \cdot 10^{-13} \text{ m.s}^{-1}$ ). Vers la dizaine d'années, on atteint alors un régime pseudo permanent caractérisé par une très lente évolution du profil de désaturation.

Après 100 ans, le degré de saturation est de l'ordre de 10 % à 20 % dans le béton de soutènement, de 20 % sur toute l'épaisseur de la zone fracturée, puis il augmente rapidement vers 80-90 % dans la zone microfissurée et reste toujours supérieur à 97 % dans les argilites non perturbées mécaniquement où il atteint 100 % après quelques mètres (Figure 6.3.3). Si la galerie restait ouverte sur des durées pluriséculaires, ce profil n'évoluerait quasiment pas.

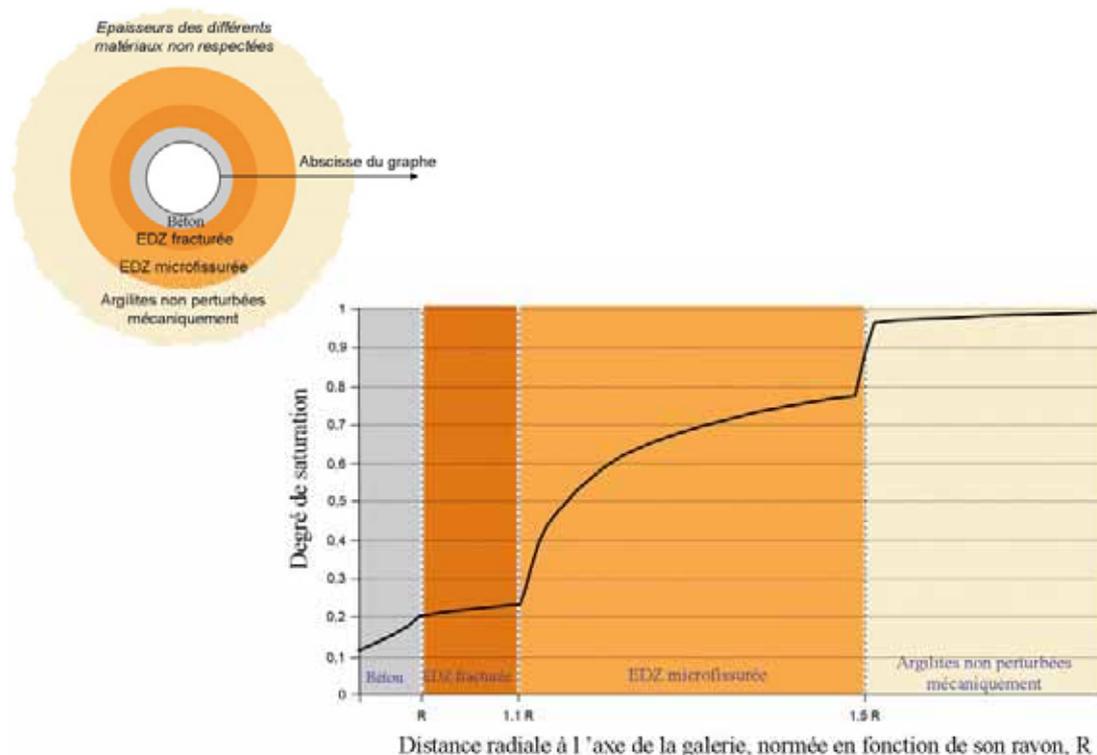


Figure 6.3.3 Représentation schématique du profil du degré de saturation quasi stationnaire atteint dans et autour d'une galerie après une durée d'ouverture d'au moins dix ans

Dans les puits par lesquels l'air arrive, la désaturation du béton de soutènement est moins marquée car l'hygrométrie relative de l'air de ventilation y est plus élevée. Le degré de saturation des bétons est de l'ordre de 40 % à 50 %, et il est de 50 % dans toute la zone fracturée de l'EDZ. Le reste du profil de saturation est similaire à la description précédente.

### ● **Les alvéoles de déchets B**

Durant la période d'exploitation, les alvéoles de déchets B se comportent de façon similaire aux galeries. Les différences proviennent principalement :

- d'une épaisseur de béton de revêtement plus importante ;
- de l'orientation des alvéoles parallèlement à la contrainte géomécanique horizontale majeure, ce qui a pour effet de ne pas créer de zone fracturée lors du creusement de ces ouvrages à une profondeur de 500 mètres (cf. § 8.2.3).

Le béton de revêtement occupe une partie non négligeable du volume excavé, ce qui implique des épaisseurs pouvant atteindre plusieurs mètres. Après sa prise (quelques semaines à quelques mois), les conditions hydriques imposées par l'air de ventilation provoquent, à partir des parois de l'alvéole, une forte désaturation dans le béton. Cette désaturation se propage vers l'extérieur et atteint la zone microfissurée des argilites en paroi de l'excavation au bout de quelques mois à un an. Le degré de saturation dans le béton est alors proche de 30 %.

Par la suite, le phénomène de désaturation se propage dans les argilites. Au bout de quelques dizaines d'années, le degré de saturation est compris entre 20 % et 30 % dans le béton. Il varie rapidement vers 90 % dans la zone microfissurée et atteint 100 % après quelques mètres dans les argilites non perturbées mécaniquement.

### ● **Le cas particulier des alvéoles de déchets exothermiques et des galeries soumises à une charge thermique**

De manière générale, l'augmentation de température dans les milieux poreux peu perméables est susceptible d'engendrer une expansion volumique de l'eau qui peut théoriquement produire une surpression. Ceci n'est toutefois possible que lorsqu'il y a concomitance d'un état saturé en eau et d'une augmentation de température.

Or, dans les alvéoles de déchets B exothermiques et dans les galeries soumises à une charge thermique, cette concomitance n'existe pas puisque la période d'augmentation de la température (la dizaine d'années dans les alvéoles de déchets B et quelques centaines d'années dans les galeries) est bien inférieure à la durée nécessaire pour un retour à la saturation à l'intérieur de ces ouvrages.

En revanche, dans les argilites, l'expansion thermique de l'eau provoque des surpressions de quelques MPa (Wendling, 2005) qui atteignent leur maximum en une à plusieurs centaines d'années et à des distances radiales d'ordre décimétrique à pluridécimétrique de la paroi des ouvrages (Figure 6.3.4). Néanmoins, les flux d'eau convergents créés par ces surpressions dans un milieu dont la perméabilité est faible ne sont pas suffisants pour influencer significativement la désaturation pendant la phase d'exploitation, ni même au-delà.

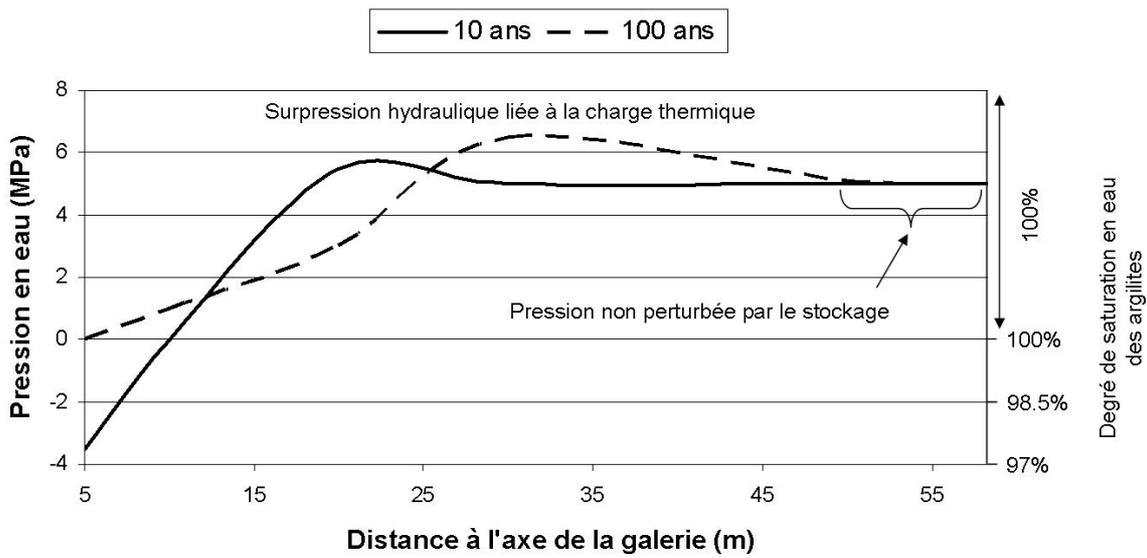


Figure 6.3.4 *Évolution dans le temps du profil de pression hydraulique dans les argilites autour d'une galerie ouverte pendant plusieurs dizaines d'années et soumise à une charge thermique*

Les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés sont proches de la saturation dès leur fermeture, et donc durant la phase thermique. Une surpression hydraulique engendrée par la charge thermique peut alors se produire dans les argilites autour des alvéoles. Pour les déchets C, elle engendre un écoulement divergent, car le maximum de la surpression est situé à la paroi des alvéoles. Pour les combustibles usés, **(i)** la mise en place de la barrière ouvragée en argile gonflante à environ 80 % de saturation implique une légère désaturation des argilites en parois ce qui retarde la montée en pression en parois de l'alvéole de plusieurs dizaines d'années **(ii)** le maximum de surpression est situé loin de la paroi des alvéoles durant cette période (Figure 6.3.5) et **(iii)** l'écoulement créé par la surpression hydraulique d'origine thermique est convergent vers les alvéoles. Ces surpressions perdurent quelques centaines d'années au maximum. Les flux créés diminuent plus rapidement, en quelques dizaines d'années, suite à l'homogénéisation croissante de la température dans les argilites.

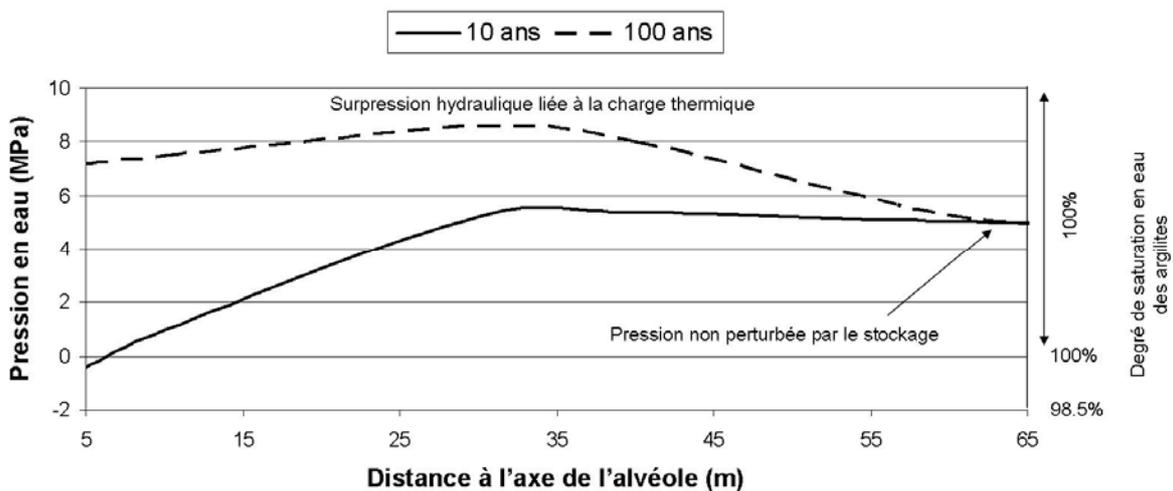


Figure 6.3.5 *Évolution dans le temps du profil de pression hydraulique dans les argilites autour d'une alvéole de combustibles usés*

### 6.3.2 La resaturation du stockage en postfermeture et l'effet de l'hydrogène produit par la corrosion des métaux

La fermeture progressive du stockage depuis les alvéoles de stockage jusqu'à la mise en place des scellements des puits entraîne l'arrêt de la décharge hydraulique et de la désaturation. Une nouvelle phase d'évolution hydraulique se met en place, à savoir la resaturation du stockage et des argilites éventuellement désaturées à son pourtour, puis l'atteinte d'un nouvel état d'équilibre hydraulique dans le stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien environnant. Cette phase est influencée par la production d'hydrogène de corrosion et sa migration.

Dans les paragraphes qui suivent, on abordera tout d'abord les phases principales de production d'hydrogène puis on décrira le schéma général de la migration de l'hydrogène dans le stockage et le Callovo-Oxfordien avant de proposer une approche plus détaillée pour différents types d'ouvrages.

#### 6.3.2.1 La production d'hydrogène de corrosion : temps caractéristiques et quantités produites.

La fermeture du stockage emprisonne de l'air, en particulier dans les remblais des galeries. Par ailleurs, le stockage est une source de gaz du fait de la dégradation chimique de certains de ces composants. Différents mécanismes produiront des gaz (principalement de l'hydrogène) dans le stockage : la corrosion des composants métalliques, l'activité des micro-organismes, la radiolyse de l'eau et des matières organiques, l'activité alpha. La corrosion anaérobie des métaux est de loin le processus prépondérant, avec plus de 90 % des gaz produits (Talandier, 2005).

La production de l'hydrogène dans les zones de déchets C et dans les zones de combustibles usés provient essentiellement de la corrosion des conteneurages, des chemisages et des soutènements (cas des alvéoles de combustibles usés). Elle se décompose en deux phases : une première de 4 000 à 5 000 ans environ correspondant à la corrosion des soutènements et chemisages, avec une production annuelle de l'ordre de 250 m<sup>3</sup> (ce volume est estimé pour une pression de 5MPa et une température de 30 °C. Sauf mention contraire, tous les autres volumes de gaz exprimés dans la suite du texte sont également estimés pour cette pression et cette température) pour les déchets C et 1 400 m<sup>3</sup> pour les combustibles usés, puis une seconde jusqu'à la centaine de milliers d'années pendant laquelle la production diminue progressivement et correspond à la corrosion des (sur) conteneurs et des inserts (pour les combustibles usés). La baisse de la production est d'environ d'un ordre de grandeur après 5 000 ans (cf Encadré 6.1). Les quantités totales d'hydrogène produites pendant ces deux phases sont presque identiques.

Une décomposition de la production d'hydrogène en deux phases se retrouve pour les déchets B, mais avec des durées différentes : 500 ans environ pour la première phase et toujours jusqu'à environ la centaine de milliers d'années pour la seconde. Les déchets B sont hétérogènes et présentent des conditionnements très différents conduisant à des processus de production d'hydrogène multiples. Parmi ceux-ci, deux types de colis sont à l'origine de l'essentiel de la production d'hydrogène, il s'agit des colis de coques et embouts compactés (colis type B5) et des colis à enrobage bitume (colis type B2).

- Pour les colis type B5, la production de gaz est essentiellement associée à la corrosion des enveloppes métalliques et du déchet lui-même. Après la consommation des aciers non alliés sur une période de 500 ans, la production de gaz diminue significativement et se maintient à un niveau constant de l'ordre de 18 m<sup>3</sup> par an et par alvéole pendant 100 000 ans environ.
- Pour les colis type B2, l'essentiel de la production d'hydrogène provient de la radiolyse des bitumes sur une durée d'environ 50 000 ans. Entre 500 et 50 000 ans, la production de gaz (toutes sources confondues) se stabilise autour d'une valeur de l'ordre de 14 m<sup>3</sup> par an et par alvéole.

Les différentes évaluations présentées ci-dessus ont été obtenues en considérant une vitesse de corrosion des aciers non alliés de l'ordre de 2 à 3  $\mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ , mais en ne prenant pas en compte l'effet potentiel du degré de saturation de l'environnement des composants métalliques sur la vitesse de corrosion ainsi que la consommation d'eau par la corrosion.

Les évaluations actuellement disponibles (expérimentation et modélisation) tendent à indiquer que les vitesses de corrosion pourraient être significativement plus faibles et se situer entre 0,1 et 1  $\mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ , étalant ainsi la courbe de production sur une plus longue durée.

S'il est raisonnable de considérer que le degré de saturation dans les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés sera rapidement supérieur à 97 % dans les argilites en champ proche et dans l'argile gonflante (cas des combustibles usés) (cf Encadré.6.4), il apparaît en revanche que des taux de saturation très faibles pourraient être maintenus sur de longues périodes dans les alvéoles de déchets B compte tenu des caractéristiques hydriques des bétons et des jeux résiduels. Dans ces conditions, les cinétiques de corrosion pourraient être fortement influencées et la période initiale de production d'hydrogène allongée.

En outre, les quantités d'eau disponibles pour la corrosion des composants métalliques, notamment dans les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés, pourraient être limitées par les capacités de réalimentation en eau par les argilites du Callovo-Oxfordien.

Les moyens de modélisation actuellement disponibles sont capables de rendre compte des divers processus de transfert des gaz, mais ne sont pas encore en mesure de représenter les différents couplages indiqués ci-dessus.

L'ensemble de ces constatations conduit à considérer les évaluations du transfert d'hydrogène et de ses effets sur l'écoulement de l'eau et le transport des solutés présentées dans les paragraphes qui suivent comme majorantes. Le schéma présenté est donc enveloppe des évolutions possibles et permet de traiter les phénomènes de manière pénalisante.

### 6.3.2.2 Les gaz radioactifs

Différents radionucléides sont à l'état gazeux ou peuvent être potentiellement gazeux dans les conditions du stockage :  $^3\text{H}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{129}\text{I}$  ou  $^{36}\text{Cl}$ . Leur quantité est marginale par rapport à l'hydrogène de corrosion.

Compte tenu de leur faible période (respectivement 12 ans et 11 ans pour  $^3\text{H}$  et  $^{85}\text{Kr}$ ),  $^3\text{H}$  et  $^{85}\text{Kr}$  ont largement disparu par décroissance radioactive lors de la fermeture du stockage.

$^{129}\text{I}$  est gazeux dans les conditions de température, de pression et d'irradiation en réacteur où il se combine avec le césium pour former CsI, partiellement volatil dans ces conditions. Dans les conditions du stockage, lors de l'arrivée de l'eau,  $^{129}\text{I}$  se dissoudrait sous forme d'iodure I<sup>-</sup>. Sa conversion sous une forme gazeuse ( $\text{CH}_3\text{I}$  ou  $\text{I}_2$ ) apparaît très peu probable puisque ces composés sont très réactifs ou bien s'hydrolysent facilement à nouveau sous forme d'iodure (Nagra, 2003a). Il en va de même pour  $^{36}\text{Cl}$  (Giffaut, 2005).

Le  $^{14}\text{C}$  des déchets peut être à la fois sous forme inorganique et sous forme organique ( $\text{C}^{-\text{IV}}$ - $\text{C}^{-\text{VI}}$ ). Plus de 98 % de l'inventaire en  $^{14}\text{C}$  organique se trouve dans les gaines en zircaloy (colis type B5, B4 et combustibles usés). Une infime fraction du  $^{14}\text{C}$  des combustibles usés, inférieure à 0,01 %, serait directement sous forme gazeuse ( $\text{CO}_2$ ). L'inventaire total (B, C et combustibles usés) en  $^{14}\text{C}$  est de l'ordre de 500 à 600 moles. Seul le  $^{14}\text{C}$  organique peut conduire à une forme gazeuse, en l'occurrence  $\text{CH}_4$ , pour autant qu'il y est présence d'une activité bactérienne. Cela ne concernerait donc que les colis type B5.1, du fait de la présence de matière organique permettant éventuellement le développement bactérien (Libert, 2005). En l'absence d'activité bactérienne, la dissolution du carbure de fer ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ou du carbure de zirconium ( $\text{ZrC}$ ) devrait conduire à la formation d'espèces organiques

non gazeuses et solubles (acide acétique, acide formique, acétaldéhyde, formaldéhyde, éthanol, méthanol, propanol...). L'inventaire en  $^{14}\text{C}$  des B5.1 représenterait environ entre 6 % et 20 % de l'inventaire total en  $^{14}\text{C}$ , soit respectivement 20 moles à 75 moles. Dans les conditions standard (TPN), cela représenterait un faible volume de  $\text{CH}_4$  entre 1,7 m<sup>3</sup> et 0,5 m<sup>3</sup>. En outre, seuls 55 % à 85 % de ce total ( $^{14}\text{C}$  du zircaloy) seraient sous forme organique. Le carbone inorganique ( $\text{C}^{\text{IV}}$ ) libéré par les matrices d'oxyde et celui des déchets C se dissoudrait sous forme de carbonates (Johnson & Schwyn, 2004).

En conséquence, on peut considérer qu'il est possible de négliger les gaz radioactifs dans l'évolution hydraulique à long terme.

### 6.3.2.3 Les mécanismes de transfert de l'hydrogène

Il existe quatre mécanismes pouvant être invoqués pour la migration d'hydrogène dans et autour du stockage (cf Encadré 6.7) :

- la dissolution dans l'eau et la diffusion,
- l'écoulement biphasique,
- le transfert par microfissuration,
- le transfert par fracturation.

La solubilité de l'hydrogène dans l'eau est de l'ordre de 37 moles.m<sup>-3</sup> sous une pression de 5 MPa et à une température de 30 °C. Durant la première phase de production intense, la dissolution et la diffusion de l'hydrogène dans le stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien ne permettraient pas l'évacuation de l'hydrogène produit. Dès lors, l'hydrogène s'exprimera sous forme gazeuse et ne pourra être, au moins dans un premier temps, évacué que par les autres processus mentionnés ci-dessus.

On notera dès maintenant (i) que les données obtenues dans un forage dédié à la mesure des pressions d'entrée de gaz dans les argilites du Callovo-Oxfordien suggèrent que la pression de gaz induisant une fracturation est au moins égale à 12 MPa (Andra, 2005h), valeur de la contrainte verticale naturelle et (ii) que les pressions d'hydrogène développées au sein du stockage n'atteignent jamais de telles valeurs. Ainsi, le transfert par fracturation n'est pas mis en jeu.

En revanche, les deux mécanismes de migration par écoulement biphasique et par microfissuration peuvent être mis en jeu en particulier lors de la première phase de production d'hydrogène correspondant aux flux les plus importants. Leur poids respectif dans le transfert de l'hydrogène dépend des pressions d'hydrogène atteintes dans le stockage et de l'état de saturation des différents composants. Le transfert par microfissuration exige le développement de pressions d'hydrogène plus élevées que celles liées à l'écoulement biphasique (Encadré 6.7).

### 6.3.2.4 Le schéma global du transfert de l'hydrogène et de la resaturation du stockage

De manière générale, plusieurs voies potentielles de transfert sont offertes à l'hydrogène depuis les alvéoles de stockage :

- les argilites non perturbées mécaniquement et l'ensemble de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- la zone endommagée autour des différents ouvrages du stockage, les bouchons d'alvéole, les galeries (remblai et/ou soutènement / revêtement / dalle) et les scellements.

Compte tenu de leurs faibles perméabilités associées à des profils raides de courbes sorption-désorption tels que décrits dans l'Encadré 6.5, les argilites non perturbées mécaniquement, les bouchons d'alvéole et les scellements (lorsqu'ils sont saturés) sont les voies de transfert

intrinsèquement les plus difficiles pour l'hydrogène. Néanmoins, le stockage offre une surface d'échange avec le Callovo-Oxfordien de plusieurs millions de m<sup>2</sup> (à comparer à la surface axiale cumulée des puits de l'ordre de grandeur de 400 m<sup>2</sup> à 500 m<sup>2</sup>, donnant un accès direct à l'Oxfordien carbonaté en court-circuitant le Callovo-Oxfordien). Cette grande surface d'échange est favorable à l'évacuation préférentielle de l'hydrogène par le Callovo-Oxfordien.

Il est également nécessaire de tenir compte des évolutions relatives dans le temps des degrés de saturation en eau des bouchons d'alvéoles, de l'EDZ autour des galeries, des galeries et des scellements, en particulier ceux des puits, dans l'examen des voies de transfert potentielles. En effet, dans des composants non saturés, la migration du gaz est plus aisée. Or, certaines des voies de transferts potentielles seront non saturées au moment de la fermeture du stockage, notamment les scellements.

À partir de ces différentes considérations, il est possible de décrire les processus de transfert d'hydrogène et de resaturation du stockage selon un découpage temporel prenant en compte les temps d'atteinte successifs de la saturation quasi totale des bouchons d'alvéoles (10 ans pour les déchets C, 100 ans pour les combustibles usés, 1 000 ans pour les déchets B) et des scellements (1 000 ans pour les galeries et quelques dizaines d'années pour la partie supérieure des scellements de puits) ainsi que les temps caractéristiques de production d'hydrogène déjà évoqués (Encadré 6.1). En particulier on considèrera la transition entre les deux phases de production se situant à environ 5 000 ans pour les zones de déchets C et les zones de combustibles usés et 500 ans pour la zone B. Cette description se fonde sur un « temps 0 » correspondant à la fermeture des alvéoles et à la mise en place des bouchons, et sur une analyse prenant en compte le stockage des combustibles usés.

- **De 0 à 100 ans : tant que les bouchons d'alvéoles de déchets C et d'alvéoles de combustibles usés ne sont pas resaturés – une migration préférentielle des alvéoles vers les galeries du stockage.**

La barrière ouvragée et les bouchons d'alvéole sont mis en place à un degré de saturation proche de 80 %, ce qui permet à l'hydrogène produit de migrer sans entrave vers la galerie d'accès. Ainsi, tant que les bouchons d'alvéoles et a fortiori les scellements de modules n'atteignent pas un degré de saturation supérieur à 95-97 %, les ouvrages constituent la voie de transfert privilégiée pour l'hydrogène. Dans ces conditions, l'hydrogène principalement produit au sein des alvéoles, peut traverser aisément les bouchons d'alvéole puis les scellements de modules selon un écoulement biphasique (Figure 6.3.6). La valeur de 100 ans pour la resaturation de l'argile gonflante (barrière ouvragée et bouchon d'alvéole) est représentative d'une alvéole de combustibles usés. Dans le cas d'une alvéole de déchets C, le temps de resaturation du bouchon d'alvéole est plus faible, il est de l'ordre de la dizaine d'années. Un processus équivalent affecte les alvéoles de déchets B dont les scellements se comportent comme des scellements de galerie de sorte qu'ils atteindront une saturation supérieure à 95-97 % en environ 1 000 ans.

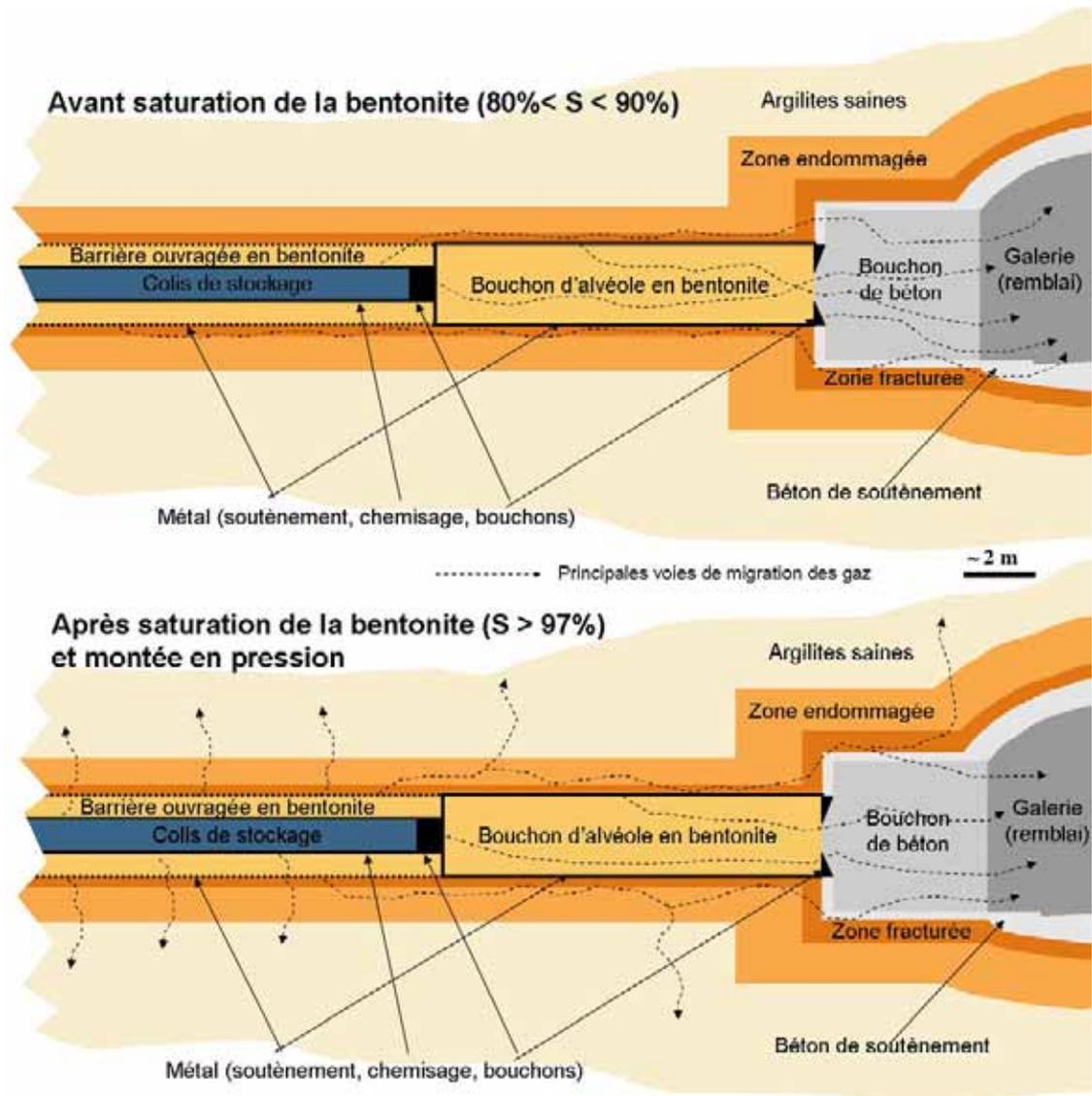


Figure 6.3.6 Schéma des principales voies de migration de l'hydrogène depuis une alvéole de combustibles usés vers sa galerie d'accès, avant et après resaturation du bouchon

Par ailleurs, les eaux de l'Oxfordien carbonaté permettent la resaturation de la partie supérieure des scellements des puits ainsi que celle des argilites à leur pourtour en moins d'une dizaine d'années (Figure 6.3.7). Ils limitent ainsi rapidement le transfert de l'hydrogène par écoulement biphasique vers l'Oxfordien carbonaté (Encadré 6.5). Durant cette première phase, la production d'hydrogène dans le stockage est très faible et représente de l'ordre de 1 % de la production totale. Dans ces conditions et compte tenu du volume offert par les galeries, la pression d'hydrogène atteinte au sein du stockage est inférieure à quelques dixièmes de MPa. Compte tenu des caractéristiques de sorption-désorption de l'argile gonflante, un tel taux de production n'empêche pas la resaturation des alvéoles et en particulier des ouvrages en argile gonflante.

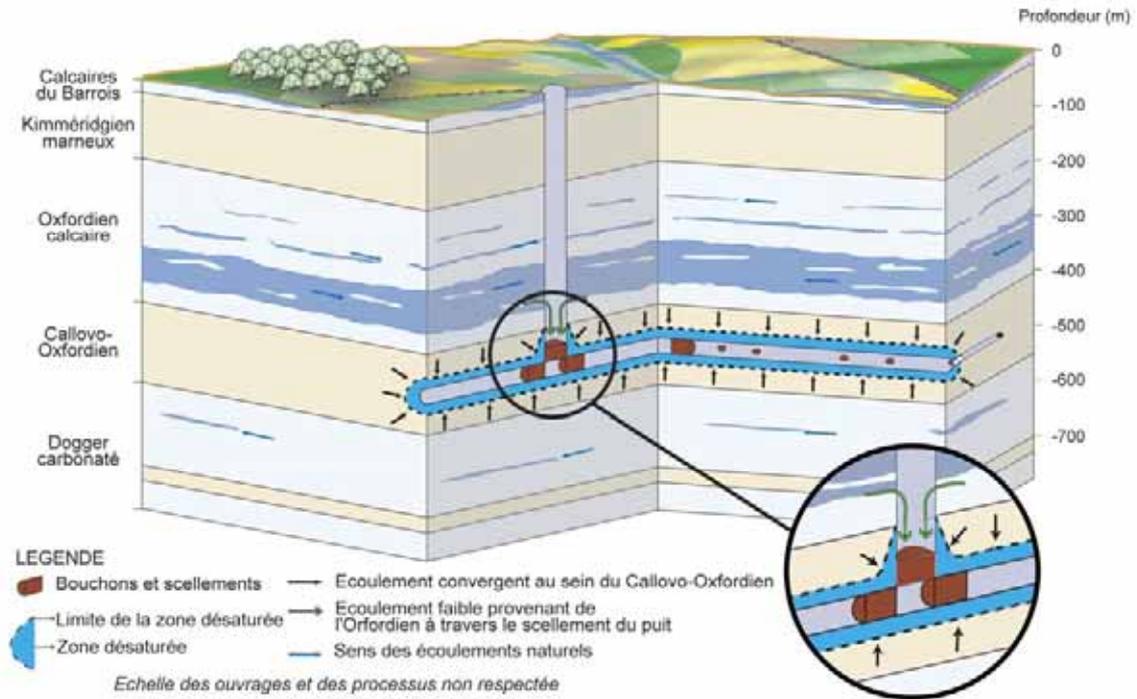


Figure 6.3.7 Schéma général de la resaturation du stockage (la partie supérieure des scellements de puits est resaturée par de l'eau en provenance de l'Oxfordien carbonaté, le reste du stockage est resaturé par des eaux en provenance du Callovo-Oxfordien)

Au-delà de 100 ans, la saturation des bouchons d'alvéoles de déchets C et d'alvéoles de combustibles usés, supérieure à 97 % et correspondant à une pression de gonflement proche de 7 MPa à l'équilibre géostatique, limite considérablement le passage de l'hydrogène par écoulement biphasique. Celui-ci commence alors à monter en pression au sein des alvéoles.

- **De 100 ans à 2 000-3 000 ans : la montée en pression dans les alvéoles puis dans les galeries et la mise en place d'un écoulement biphasique dans le Callovo-Oxfordien**

Le comportement de l'hydrogène dépend alors des caractéristiques d'écoulement biphasique (perméabilités, courbes de sorption-désorption) et géométriques (surface) des différents matériaux présents à l'interface eau-gaz dans l'alvéole. L'hydrogène migre par écoulement biphasique dans l'ensemble des composants (bouchons en argile gonflante, EDZ, barrière ouvragée dans les alvéoles de combustibles usés et argilites saines) (Figure 6.3.6). La voie offrant le moins de résistance est l'EDZ initiale. Néanmoins, dans les argilites endommagées, le développement de la pression de gonflement au voisinage des bouchons devrait conduire à une cicatrization de l'EDZ. Les observations indiquent une restauration de la perméabilité à l'eau initiale, mais ne permettent pas actuellement de démontrer un phénomène équivalent pour le transfert du gaz. Toutefois, les mécanismes mis en jeu dans la cicatrization (gonflement, diminution de la porosité sous l'effet du chargement mécanique) devraient aussi conduire à une restauration au moins partielle des propriétés d'écoulement biphasique.

Les profils des courbes de sorption-désorption des argilites et de l'argile gonflante étant proches, la répartition des flux de gaz dépendra essentiellement des rapports de perméabilité entre argile gonflante (bouchon d'alvéole et/ou barrière ouvragée) et argilites (Callovo-Oxfordien) et des rapports des surfaces offertes à la migration du gaz par ces deux composants.

Dans les alvéoles de déchets C, les calculs indiquent qu'un transfert axial au travers du bouchon vers les galeries est majoritaire. Une cicatrisation imparfaite de l'EDZ accentuerait ce transfert préférentiel vers les galeries.

Dans les alvéoles de combustibles usés, l'hydrogène produit au niveau du soutènement suit le même cheminement que celui décrit pour les alvéoles de déchets C. L'hydrogène produit au niveau du chemisage traverse la barrière ouvragée puis suit la voie axiale décrite ci-dessus. Le transfert par cette voie axiale pourrait être accentué par les produits de corrosion du soutènement qui peuvent constituer une interface imparfaite entre les argilites et l'argile gonflante (barrière ouvragée et bouchon)

Dans les alvéoles de déchets B, après saturation du scellement (1 000 ans), le rapport des surfaces axiale et radiale favorise également le transfert d'hydrogène vers les galeries.

Dans ces conditions, et compte tenu des surfaces offertes, bien que le Callovo-Oxfordien constitue une voie possible pour le transfert biphasique de l'hydrogène (Figure 6.3.8), les calculs montrent néanmoins que c'est vers les galeries que se dirige la part la plus importante du gaz produit dans les alvéoles, ce en traversant ou contournant les scellements.

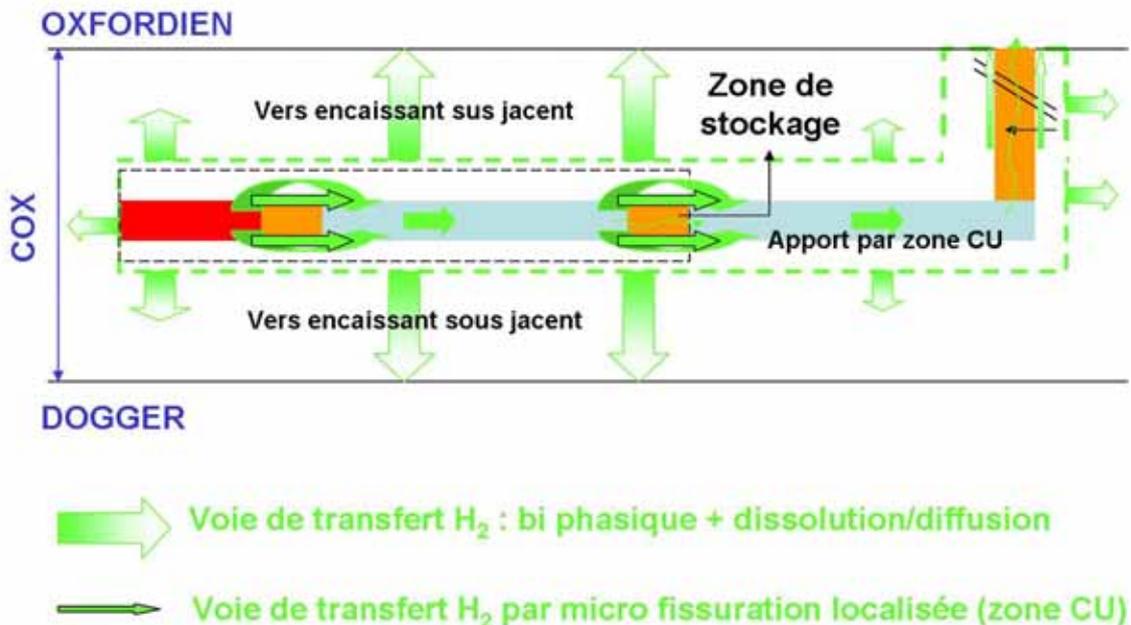


Figure 6.3.8 Schéma des voies de transfert de l'hydrogène dans le stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien environnante

*Encadré 6.7      **Le modèle conceptuel du transport de gaz dans les milieux argileux denses (1/2)***

Le modèle conceptuel actuellement développé pour représenter le transport de gaz dans des argiles profondes (argilites, Opalinus Clay) et des argiles gonflantes denses, initialement saturées, comprend 4 phases successives correspondant chacune à un mécanisme spécifique (Talandier, 2005). L'enchaînement de ces mécanismes dépend de la pression et du flux de gaz :

- Le premier mécanisme est celui de la **dissolution du gaz** dans l'eau, et de son **transport par convection - dispersion et/ou diffusion** à l'état dissous (schéma A, ci-après).

Les coefficients de diffusion des gaz dissous dans les argiles et les perméabilités des argiles étant faibles, ce mécanisme ne permet pas de transporter des quantités de gaz importantes. Ainsi dès lors que le flux de gaz est trop important par rapport aux capacités de dissolution et de transport du gaz à l'état dissous, le second mécanisme s'enclenche.

- Le second mécanisme est l'**écoulement biphasique** (schéma B, ci-après). Le flux de gaz produit reste sous forme gazeuse et migre dans la porosité selon un écoulement de type darcéen en désaturant partiellement le milieu suivant la pression de gaz atteinte (Encadré 6.5).

Ce mécanisme de transfert est indépendant du champ de contrainte mécanique appliqué à l'argile et la porosité de l'argile n'est pas modifiée lors de l'écoulement du gaz. Comme le nom biphasique l'indique, ce mécanisme met donc conjointement en mouvement l'eau et le gaz. On définit alors la perméabilité à l'eau et la perméabilité au gaz (au sens de Darcy) en fonction du degré de saturation de l'argile.

- Le troisième mécanisme s'initie si le flux de production de gaz ne peut pas être évacué par les deux premiers mécanismes. La migration du gaz est alors couplée au comportement mécanique. Plus précisément, elle dépend des forces de contact entre les solides du squelette argileux. La pression de gaz augmente jusqu'à vaincre localement les forces de contact (cohésion), elle « dilate » la porosité et le gaz peut alors progresser dans la porosité de taille plus importante ainsi créée (schéma C, ci-après). À l'échelle microscopique, cette dilatation de la porosité correspond à la formation de **microfissures** localisées. Compte tenu de la faible viscosité des gaz et de la faible affinité des gaz avec les solides (comparativement à celles de l'eau), ce mécanisme de transfert par microfissuration permet le transfert de quantités importantes de gaz, bien qu'il s'agisse de microfissures localisées.

Pendant ce mécanisme purement mécanique et contrairement au transfert biphasique, l'eau n'est pas déplacée à l'avant du front de pénétration du gaz. En toute rigueur, on ne peut donc plus appliquer le concept d'écoulement type Darcy.

Si la pression de gaz diminue, les microfissures ne peuvent plus être maintenues ouvertes. La microporosité initialement créée se contracte mécaniquement et l'eau peut venir réoccuper *in fine* toute la porosité. Associée au gonflement des minéraux argileux au niveau des microfissures, elle permet alors une autocompaction de l'argile vis-à-vis de l'écoulement de l'eau dans l'argile redevenue totalement saturée. Celle-ci retrouve sa perméabilité à l'eau initiale.

Dans l'argile gonflante, le mécanisme de microfissuration peut être initié dès lors que la pression de gaz dépasse la pression de gonflement. La pression de gonflement de l'argile gonflante à l'équilibre mécanique avec les argilites dans le stockage se situe à 7 MPa

Dans les argilites, la pression effective de gaz conduisant à une microfissuration a été positionnée à une valeur inférieure à la pression de fracturation (12 MPa, cf ci-dessous). Par comparaison avec les résultats obtenus sur l'Opalinus Clay, et en considérant la valeur seuil de la pression d'entrée de gaz obtenue en forage sur le site de Meuse / Haute-Marne, on a retenu une valeur aux alentours de 9 MPa.

**Le modèle conceptuel du transport de gaz (2/2)**

- Le quatrième mécanisme s'initie si le flux de gaz est encore trop important pour pouvoir être évacué par les trois mécanismes précédents. Dans ce cas la pression de gaz continue à augmenter au-delà du champ de contraintes mécaniques jusqu'à atteindre le seuil de **rupture** de l'argile au regard de ce champ de contraintes. Ce ne sont plus des microfissures qui sont créées, mais une fracture (schéma D, ci-après). Celle-ci s'oriente perpendiculairement à la direction de la contrainte mineure. Pour les argilites, ainsi que le suggèrent les résultats des essais en forage, il faudrait des pressions effectives de gaz supérieures à 12 MPa pour que ce mécanisme s'initie.

Comme pour les microfissures, (i) l'extension et l'ouverture d'une fracture sont fonction *pro parte* de la pression de gaz et du flux de gaz associé, (ii) il n'y a pas de déplacement d'eau significatif, celle-ci ne se déplaçant que localement et au moment de l'ouverture de la fracture : seul le gaz peut s'y écouler sans entraîner d'écoulement d'eau, et (iii) il y a autocalcitratisation de la perméabilité à l'eau après retour à l'état totalement saturé.

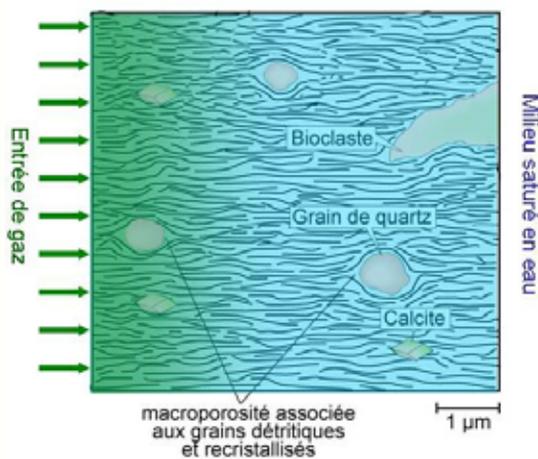


Schéma A : Dissolution et convection/diffusion

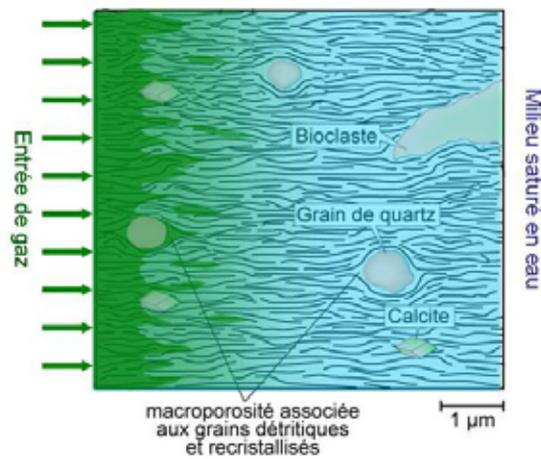


Schéma B : Écoulement bi-phasique

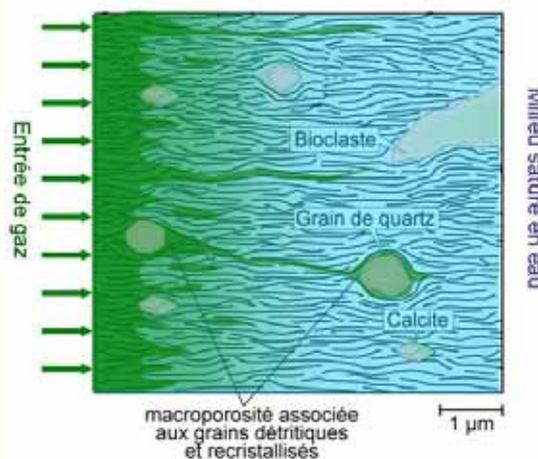


Schéma C : micro-fissuration

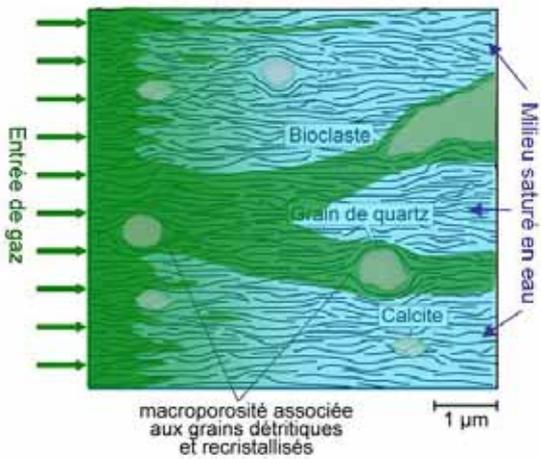


Schéma D : Fracturation

La fraction de l'hydrogène qui atteint les galeries, s'y déplace tant que les scellements de galeries ne sont pas resaturés à un niveau supérieur à 95-97 %. Ce degré de saturation est atteint à environ 1 000 ans. Dès lors, la pression de gaz augmente et devient quasi uniforme à l'intérieur d'un module (galeries de modules et alvéoles).

Cette pression atteint un maximum entre 2 000 et 3 000 ans pour les zones de stockage de déchets C et les zones de stockage de combustibles usés. Elle est alors de l'ordre de 6 à 7 MPa pour les zones de stockage de déchets C et atteint 9 MPa pour les zones de combustibles usés en raison d'un terme de production plus important. Le maximum de pression d'hydrogène (environ 7 MPa) serait atteint vers 500 ans dans la zone de stockage de déchets B.

Pour les zones de combustibles usés, la valeur de 9 MPa est égale à la pression de microfissuration des argilites retenue (Encadré 6.7) et supérieure à la valeur de la pression de gonflement de l'argile gonflante atteinte au niveau des scellements et des bouchons. Ainsi, un réseau de microfissures connectées apparaît au niveau des scellements de modules (dans l'EDZ et/ou dans l'argile gonflante) qui permet un transfert de l'hydrogène des zones de stockage de combustibles usés vers les galeries de liaison. Ces dernières offrent un volume d'expansion suffisamment important pour que la pression puisse baisser jusqu'à des valeurs de 5 à 6 MPa et que la production d'hydrogène des zones de combustibles usés n'impacte pas les autres zones de stockage B et C. L'hydrogène s'évacue alors par écoulement biphasique dans le Callovo-Oxfordien.

Parallèlement à ce processus local et transitoire n'affectant que les zones de combustibles usés, le transfert biphasique dans le Callovo-Oxfordien se poursuit (vers le Dogger calcaire et l'Oxfordien carbonaté) en utilisant la surface d'échange importante du stockage avec le Callovo-Oxfordien offerte à la migration de l'hydrogène. Au droit des zones de déchets B et C ainsi que des galeries de liaison et des puits, cet écoulement biphasique affecte au maximum (à l'atteinte de la pression maximale de gaz dans les zones de stockage) 40 m de Callovo-Oxfordien de part et d'autre du stockage. Au droit des zones de stockage de combustibles usés, le front de migration biphasique de l'hydrogène atteindrait les encaissants. Cet écoulement biphasique ne concerne qu'une très faible fraction de la porosité et n'entraîne qu'une désaturation négligeable des argilites, le degré de saturation restant supérieur à 97 % en champ proche et à 99 % en champ lointain.

Compte tenu des flux d'hydrogène et des débits d'eau dans ces encaissants, aucune perturbation hydraulique notable du système ne sera engendrée et l'hydrogène gazeux passera rapidement sous forme dissoute dans l'Oxfordien carbonaté et le Dogger calcaire (Talandier, 2005). La fraction d'hydrogène qui atteint les encaissants à l'état dissous au droit de l'ensemble du stockage reste dans cet état physique. L'ensemble de l'hydrogène ainsi dissous dans les encaissants est entraîné et dilué par convection-dispersion.

#### ● De 2 000-3 000 ans jusqu'à 100 000 ans : la chute de la pression d'hydrogène

Au-delà de 2 000 à 3 000 ans, le volume d'expansion offert à l'hydrogène par le Callovo-Oxfordien avec l'écoulement biphasique favorise la dissolution diffusion de l'hydrogène. Ces deux processus expliquent que la pression de gaz diminue à cet horizon dans le stockage alors que les flux de production restent encore importants, et ce, jusqu'à 4 000-5 000 ans. Au delà, le flux de production dans les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés diminue considérablement (Encadré 6.1). À cette date, les pressions d'hydrogène dans les zones de stockage de déchets C et les alvéoles de combustibles usés ont baissé d'environ 0,5 à 1 MPa.

La chute de la production d'hydrogène vers 5 000 ans pour les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés, et 500 ans pour les alvéoles de déchets B marque l'arrêt de l'avancée biphasique de l'hydrogène dans le Callovo-Oxfordien vers les encaissants et le début du retour à un état totalement saturé du stockage. Au delà de cette date, le mécanisme dominant pour la migration de l'hydrogène vers les encaissants devient la dissolution-diffusion.

Il faut ensuite quelques dizaines de milliers d'années pour que tout le Callovo-Oxfordien retrouve une saturation supérieure à 99 %.

- **Au-delà de 100 000 ans : la resaturation totale du stockage et l'atteinte d'un nouvel état d'équilibre hydraulique**

Il faut environ la centaine de milliers d'années pour que le degré de saturation en eau dans les galeries soit supérieur à 90 %. On estime que quelques dizaines de milliers d'années supplémentaires sont nécessaires pour que ce degré de saturation atteigne 95-97 %. Dès lors, un nouvel état de quasi-équilibre hydraulique s'établit dans le stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien environnante. Au cours de cette période, l'hydrogène continue à s'évacuer par dissolution-diffusion. Ce n'est qu'au-delà de plusieurs centaines de milliers d'années après la fermeture du stockage que la totalité de l'hydrogène a été évacuée vers les encaissements.

### 6.3.2.5 L'organisation globale des écoulements d'eau pendant le transfert de l'hydrogène

Dans les paragraphes précédents, on s'est attaché à décrire les mécanismes conduisant au transfert d'hydrogène au sein du stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien. De tels transferts ont des implications sur les écoulements d'eau dans et autour du stockage, ainsi que sur les cinétiques de resaturation des différents ouvrages et de la formation du Callovo-Oxfordien. On peut présenter un découpage temporel des écoulements d'eau qui reprend globalement celui présenté dans les paragraphes précédents sur le transfert de l'hydrogène.

- **Pendant la phase d'exploitation**

Le schéma d'écoulement est globalement convergent du Callovo-Oxfordien vers les ouvrages en raison de la décharge hydraulique et de la désaturation liée à la ventilation pour ce qui concerne les galeries et les alvéoles de déchets B. Au cours de cette période, la fraction d'hydrogène « négligeable » produite dans les alvéoles et migrant vers les galeries est évacuée par la ventilation.

- **Après fermeture du stockage et jusqu'à l'atteinte de la pression maximale d'hydrogène dans le stockage : 2 000-3 000 ans pour les zones de déchets C et les zones de combustibles usés et 500 ans pour la zone de déchets B.**

La pression de l'eau interstitielle du Callovo-Oxfordien en champ proche du stockage évolue en fonction de la pression d'hydrogène: elle atteint en parois d'alvéole une valeur maximale d'environ 6 MPa pour les déchets C à 3 000 ans, 8 MPa pour les combustibles usés à 2 000 ans (Figure 6.3.9), et 6,5 MPa pour les déchets B à 500 ans. Puis elle diminue comme la pression d'hydrogène. Durant cette phase, les écoulements sont divergents autour des alvéoles, mais demeurent très lents. Les gradients hydrauliques créés dans la couche du Callovo-Oxfordien en champ très proche (sur quelques mètres) peuvent atteindre des valeurs maximales de l'ordre de 20 m/m pour les zones de combustibles usés et de 6 m/m pour les zones de déchets B et C. Au-delà de ces quelques mètres, les surpressions créées dans le Callovo-Oxfordien sont faibles et systématiquement inférieures à 0,5 MPa et, dans la plupart des cas (zones B et C en particulier), inférieures à 0,1 MPa.

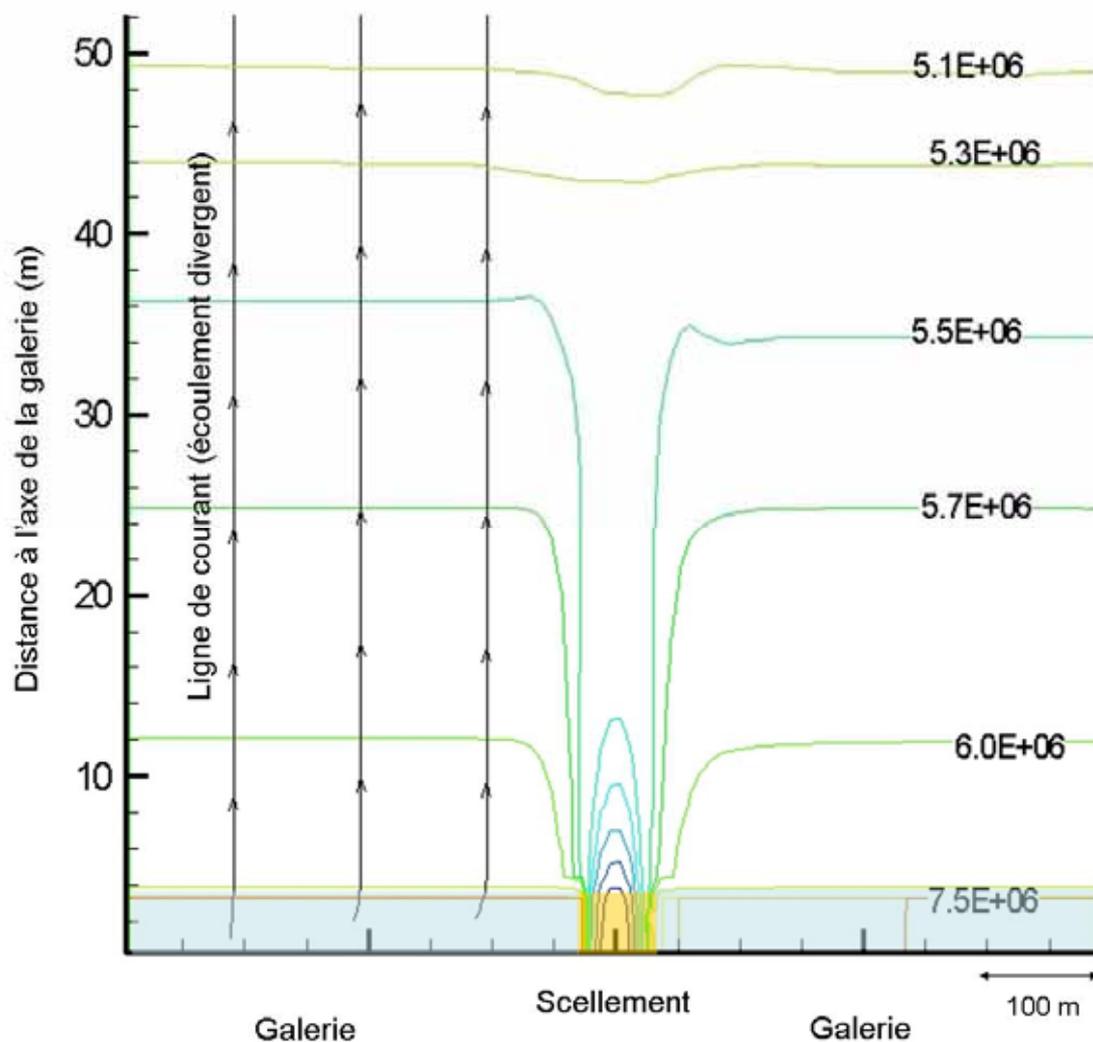


Figure 6.3.9 Courbes d'isopression en eau (Pa) dans le Callovo-Oxfordien autour d'une galerie d'un module de stockage de combustibles usés (au moment de la pression maximale d'hydrogène, soit environ 2 000 ans). Les écoulements d'eau sont divergents de la galerie vers les argilites. Dans cette figure, l'échelle des ordonnées est dilatée d'un facteur 15

Au sein du stockage, l'hydrogène n'empêche pas la resaturation des scelllements et des bouchons. Lorsque l'hydrogène migre à l'intérieur des galeries, il est susceptible de provoquer de manière transitoire le déplacement de l'eau contenue dans les remblais, dans l'axe des galeries. Toutefois, compte tenu de la géométrie allongée des galeries et de la présence des scelllements, cette composante reste faible par rapport aux écoulements en direction du Callovo-Oxfordien.

Dès la première centaine d'années, les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés sont resaturées. La production d'hydrogène n'a pas d'influence sur l'évolution de leur saturation en raison des caractéristiques hydriques des argilites et des argiles gonflantes (Encadré 6.5).

À la fin de cette période, l'ensemble des scelllements du stockage est resaturé et le degré de saturation du Callovo-Oxfordien est supérieur à 97 % en champ proche et à 99 % en champ lointain.

- **Au-delà de 2 000-3 000 ans et jusqu'à 10 000 ans : l'effacement de la surpression hydraulique liée à l'hydrogène**

Les surpressions hydrauliques dues au gaz dans le Callovo-Oxfordien et au droit de chaque zone de stockage diminuent progressivement avec la chute de la pression d'hydrogène. Elles ont disparu vers 9 000 ans (Figure 6.3.10), 7 000 ans et quelques milliers d'années respectivement pour les zones de combustibles usés, de déchets C, et de déchets B. Dès lors, les écoulements sont convergents vers le stockage et le processus global de resaturation complète du stockage peut s'amorcer. Il concernera principalement les alvéoles de déchets B et les galeries. À la fin de cette période, le degré de saturation atteint dans les argilites ( $\gamma$  compris en champ proche) est supérieur 99 %.

On rappelle que pendant cette phase de, l'hydrogène est rapidement en isopression à l'intérieur de chaque zone de stockage et ne constitue plus un moteur pour le déplacement d'eau à l'intérieur du stockage.

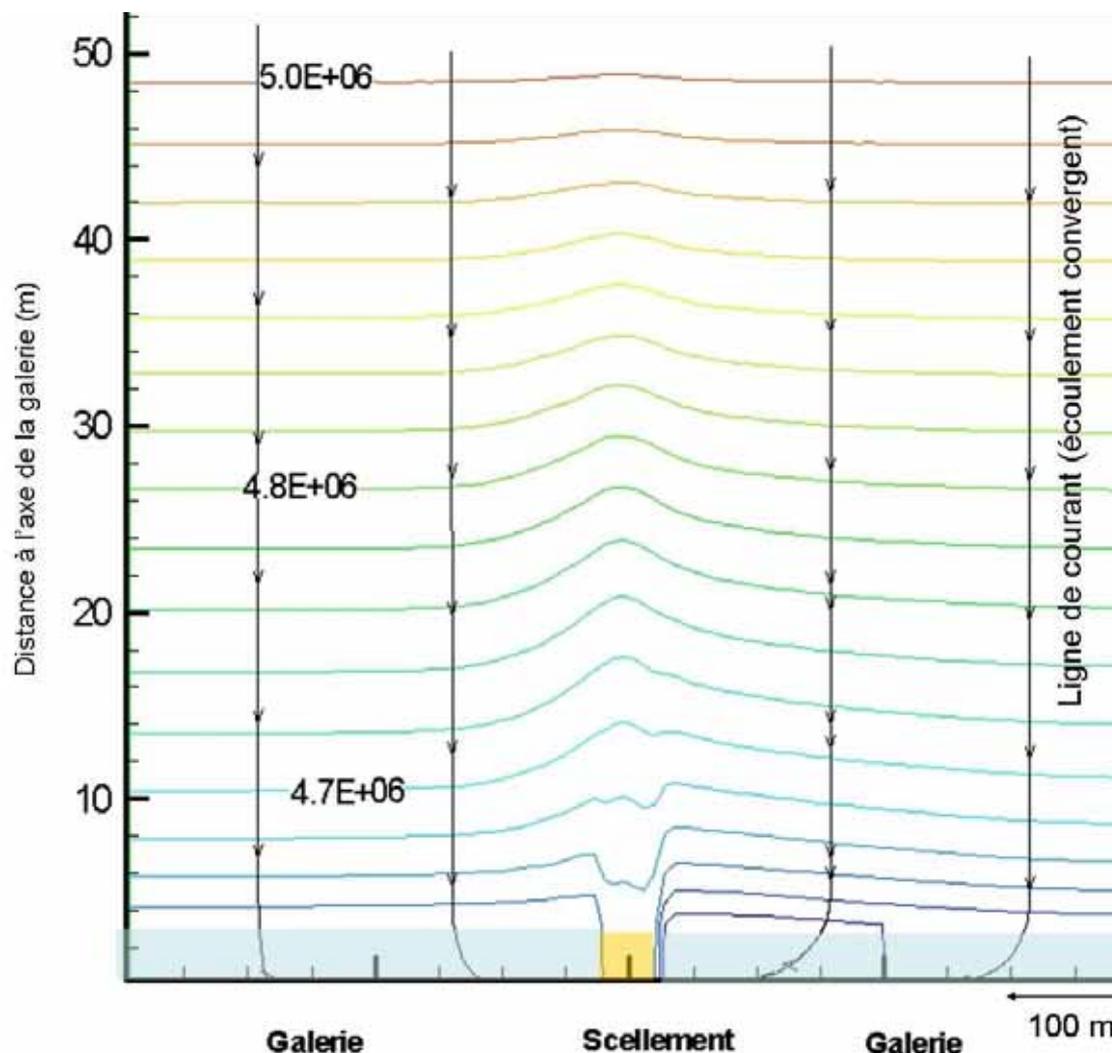


Figure 6.3.10 Courbes d'isopression en eau (Pa) dans le Callovo-Oxfordien autour d'une galerie d'un module de stockage de combustibles usés à 9 000 ans environ. Les écoulements d'eau sont convergents vers la galerie. Dans cette figure, l'échelle des ordonnées est dilatée d'un facteur 15

- Au-delà de 10 000 ans : l'atteinte d'un nouvel équilibre hydraulique

### Schéma général

Jusqu'à l'atteinte d'un degré de saturation supérieur à 97 % des remblais et des composants des alvéoles de déchets B, les écoulements sont convergents depuis le Callovo-Oxfordien vers le stockage (Figure 6.3.7). En raison de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien, les flux d'eau sont faibles et au maximum de l'ordre du litre par mètre linéaire de galerie et par an. Cette lente cinétique combinée à l'effet de l'hydrogène impose des temps de resaturation ( $S > 97\%$ ) dans les galeries de l'ordre de 200 000 ans après la fermeture du stockage. Des temps caractéristiques de resaturation similaires sont à considérer pour les alvéoles de déchets B.

Le retour à l'équilibre hydraulique est quasi concomitant de ce processus de resaturation. Il est donc atteint environ 200 000 ans après la fermeture du stockage. Dès lors, les écoulements dans le stockage et dans le Callovo-Oxfordien au droit du stockage s'organisent en fonction (i) des conditions hydrauliques aux limites imposées par les encaissements et (ii) des perméabilités des composants du stockage, principalement les bouchons et les scellements.

Ces conditions aux limites imposent sur l'essentiel de la zone de transposition un gradient vertical ascendant du Dogger calcaire vers l'Oxfordien carbonaté. Le stockage draine une partie du flux d'eau ascendant créé par le gradient naturel estimée à quelques  $m^3$  par an. La présence des scellements qui ont une faible perméabilité (de l'ordre de  $10^{-11} m.s^{-1}$  et au maximum de  $10^{-10} m.s^{-1}$ ) limite les écoulements horizontaux au sein du stockage, de sorte qu'environ une centaine de litres d'eau au maximum transitent par an vers l'Oxfordien carbonaté par les puits (Figure 6.3.11). L'essentiel du flux drainé par le stockage est restitué vers l'Oxfordien carbonaté au travers de la couche du Callovo-Oxfordien (Figure 6.3.12).

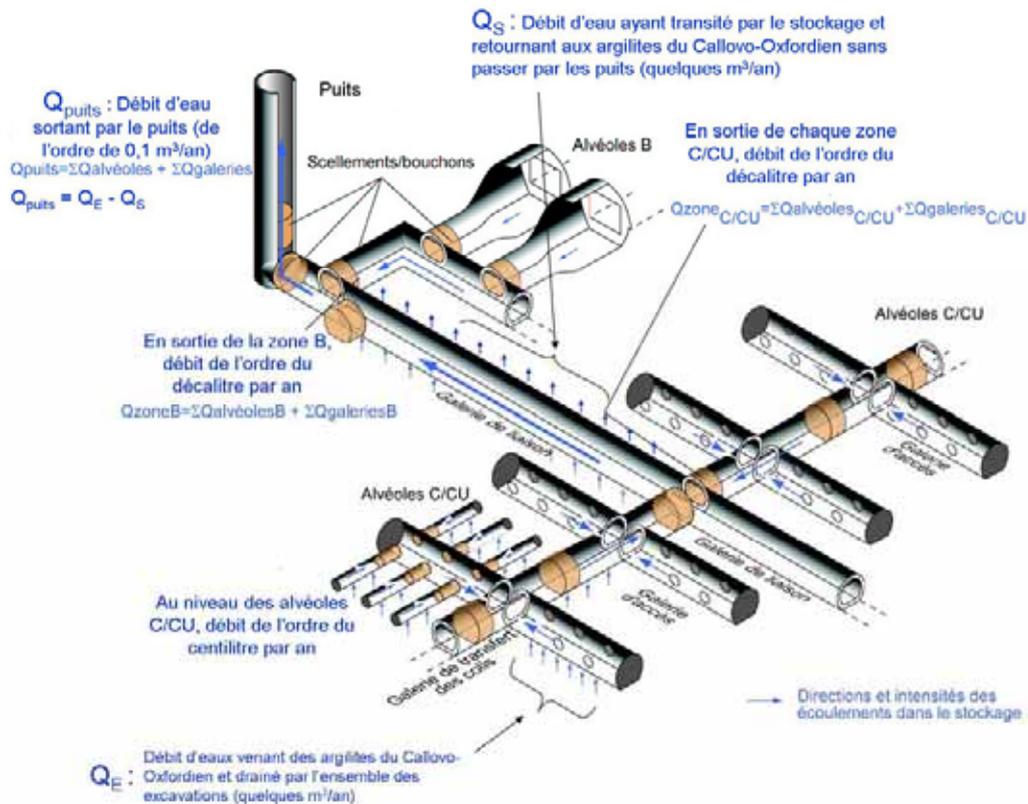


Figure 6.3.11 Schéma de l'écoulement d'eau à l'échelle du stockage après sa resaturation totale

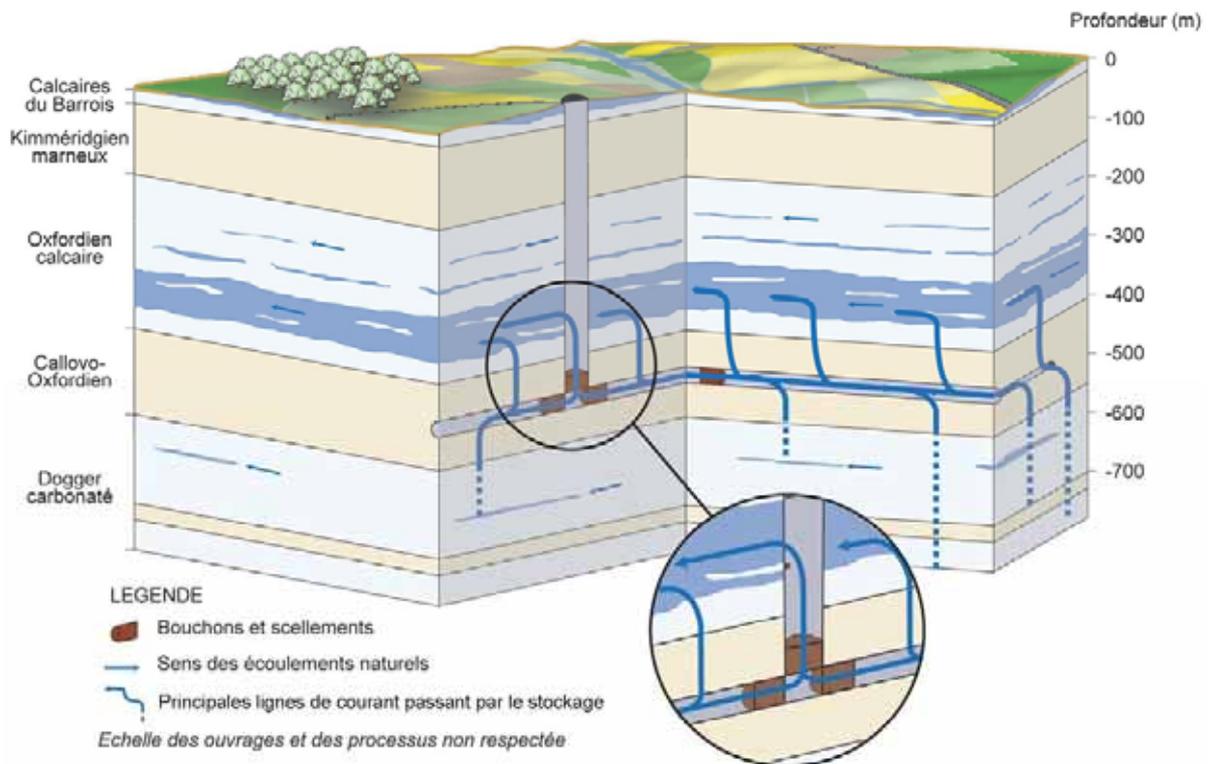


Figure 6.3.12 Exemple de lignes d'écoulement d'eau passant par le stockage après retour à l'équilibre hydraulique : La majeure partie des lignes de courant transitant par le stockage rejoignent les argilites du Callovo-Oxfordien et n'aboutissent pas au puits

### L'influence de l'évolution géomorphologique et du fluage sur l'atteinte d'un nouvel équilibre hydraulique (cf § 9)

Les charges dans les encaissants du Callovo-Oxfordien seront influencées par les évolutions géomorphologiques et notamment par l'érosion. Au cours de cette évolution, les valeurs absolues des gradients de charge verticaux à travers le Callovo-Oxfordien passent progressivement d'une valeur maximale d'environ  $0,1$  à  $0,2 \text{ m.m}^{-1}$  à une valeur maximale de l'ordre de  $0,3$  à  $0,4 \text{ m.m}^{-1}$  sur la zone de transposition. Cette modification des gradients de charge ne se ferait sentir qu'au-delà de  $300\,000$  ans, soit à une date postérieure à celle envisagée pour l'atteinte de l'équilibre hydraulique. Elles n'auraient donc aucun effet sur l'ensemble des phénomènes décrits ci-dessus et en particulier sur l'atteinte de l'équilibre hydraulique.

Les remblais ont atteint un état quasi saturé ( $S > 97\%$ ) aux environs de  $200\,000$  ans. À cette date, la vitesse de fluage est devenue très faible (de l'ordre de  $10^{-15} \text{ s}^{-1}$ ), et le fluage des argilites est alors insuffisant pour créer des surpressions notables à l'intérieur des galeries. Celles-ci seraient inférieures à  $0,01 \text{ MPa}$  et n'auraient alors qu'une influence très limitée sur les écoulements dans le stockage et à l'échelle de la couche du Callovo-Oxfordien (Wendling, 2005).

### Les interactions entre les transitoires hydrauliques et la surpression naturelle dans le Callovo-Oxfordien

À l'état initial, il existe dans le Callovo-Oxfordien une surpression de quelques dixièmes de MPa qui est attribuée à un effet osmotique. Cette surpression existe sur la totalité de l'épaisseur du Callovo-Oxfordien (Figure 3.2.1). Aucun des processus mis en œuvre lors des transitoires hydrauliques n'est susceptible de modifier les équilibres eau-roche du Callovo-Oxfordien, notamment au-delà de quelques mètres du stockage, et donc de changer le profil de surpression initial. Celle-ci reste constante dans le temps.

De par la nature des matériaux composant le stockage, ce dernier présentera globalement un potentiel osmotique plus faible que celui du Callovo-Oxfordien (Figure 6.3.13). Toutefois, comme la pression osmotique reste constante dans le Callovo-Oxfordien, la discontinuité osmotique ainsi créée n'a aucun impact sur les écoulements d'eau et en particulier sur ceux intervenant lors du transitoire hydraulique.

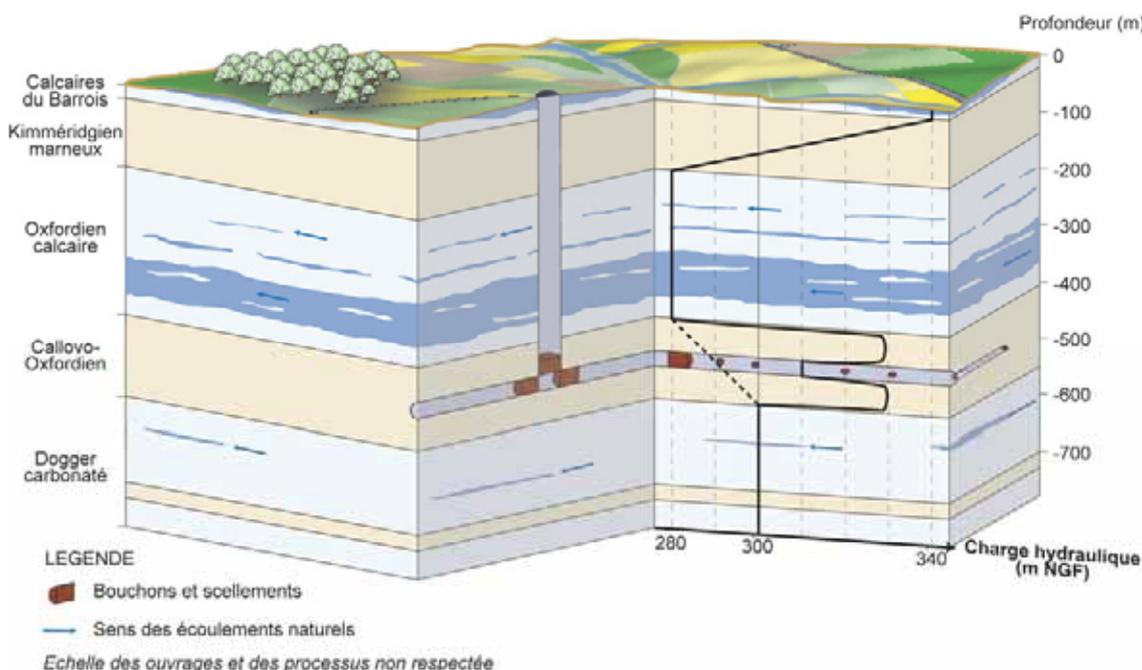


Figure 6.3.13 Schéma des charges hydrauliques dans les couches géologiques après retour à un équilibre hydraulique

#### 6.3.2.6 Les éléments particuliers de l'évolution hydraulique des alvéoles de stockage

La description générale du transitoire hydraulique dans les argilites du Callovo-Oxfordien à l'échelle du stockage et de l'influence de l'hydrogène peut être précisée à l'échelle de différents ouvrages afin de prendre en compte leurs caractéristiques spécifiques (jeu de mise place, dimension caractéristique, matériau de remplissage).

##### ● Les alvéoles de déchets B

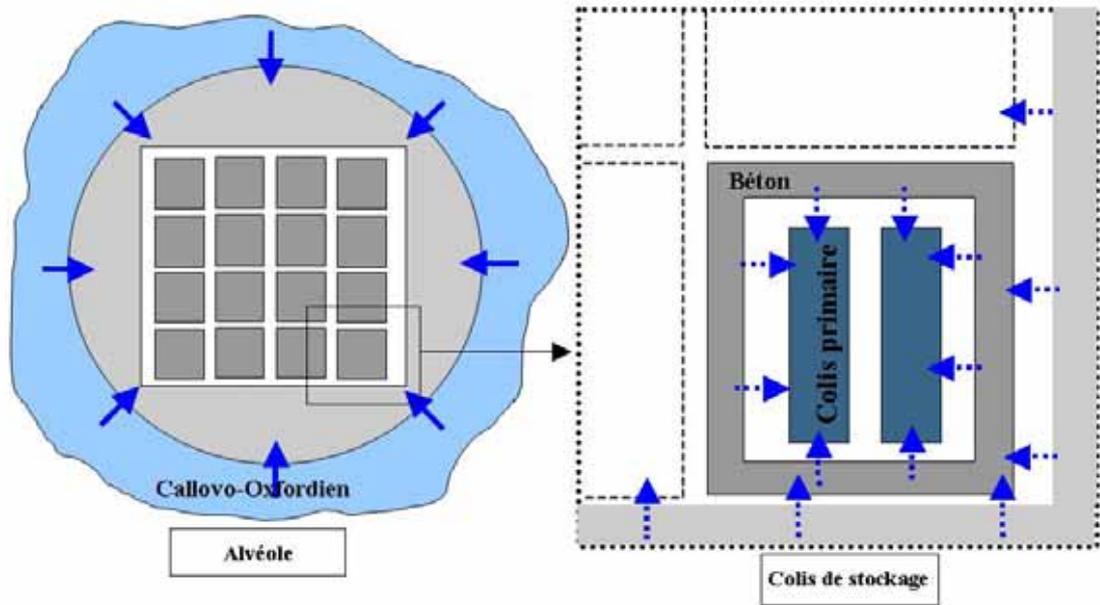
En préambule, on rappelle que l'analyse sur la production d'hydrogène de corrosion n'a pas considéré le couplage explicite entre la cinétique de corrosion et le degré de saturation en eau. Comme cela est rappelé précédemment, dans le cas de milieux très désaturés ( $S < 30-40\%$ ), la vitesse de corrosion est significativement plus faible (facteur 4 à 5 pour  $S = 30$  à  $40\%$  par rapport à  $S > 90\%$ ). Or, lors de la fermeture des alvéoles de déchets B, celles-ci sont dans un état fortement désaturé. Cependant, comme l'indiquent les modélisations (Talandier, 2005), la production d'hydrogène au sein des alvéoles dans ces conditions de saturation en eau, serait faible, mais suffisante pour entretenir ces mêmes conditions

de désaturation. Dès lors, le schéma général de l'évolution hydraulique des alvéoles tel que décrit précédemment resterait globalement valable, mais les temps mis en jeu seraient plus importants.

Bien que minimisés par conception, des jeux de mise en place entre et à l'intérieur des colis de stockage existent dans les alvéoles de déchets B. De dimensions centimétriques à pluricentimétriques, ils représentent une macroporosité dans laquelle l'eau liquide ne peut commencer à apparaître que si l'hygrométrie relative est proche de 100 %. À ces jeux, s'ajoute la macroporosité existant dans certains colis de déchets primaires comme les colis de déchets compactés (colis type B5) à la différence des colis cimentés (colis type B3).

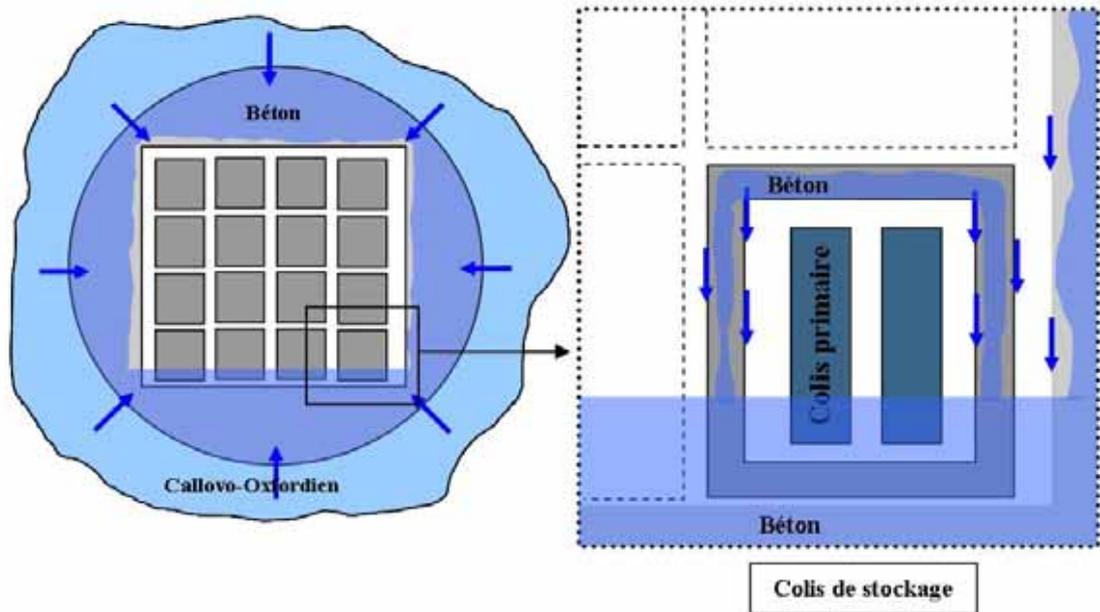
Compte tenu de l'existence de cette macroporosité, la resaturation ne sera pas homogène à l'échelle de l'alvéole. Dans les macropores, les forces de capillarité sont faibles et c'est la gravité qui domine, forçant l'eau liquide à se concentrer dans le fond des colis et de l'alvéole. La saturation en eau reste très faible dans les jeux durant toute la phase de production d'hydrogène et jusqu'à ce que la majorité de l'hydrogène soit évacuée par dissolution et diffusion aux environs de la centaine de milliers d'années. La partie interne de l'alvéole de déchets B se sature donc globalement du bas vers le haut, comme illustré sur la Figure 6.3.14. Ce même phénomène se retrouve au sein des colis de stockage et des colis primaires, suivant l'existence ou non d'une macroporosité au sein des colis de déchets primaires. Ainsi, à titre d'exemple, au sein des colis de stockage type B5, les colis primaires sont à un degré de saturation en eau faible, de l'ordre de 20 % à 30 %, pendant plusieurs dizaines de milliers d'années. À l'inverse, les colis de stockage de type B3 dont les colis primaires contiennent des déchets cimentés sont à un degré de saturation en eau plus élevé, de l'ordre de 80 %, pendant la même période. Ces différences d'évolution du degré de saturation des colis de stockage de déchets B sont illustrées sur le chronogramme de la Figure 6.3.15. La saturation en eau des différentes macroporosités sera donc obtenue tardivement dès lors que le béton de revêtement ou les bétons des conteneurs de colis de stockage atteindront un degré de saturation proche de 100 % permettant le suintement de l'eau dans ces macroporosités et leur remplissage progressif par l'eau.

Les différents temps caractéristiques de l'évolution hydraulique des composants des alvéoles de déchets B sont rappelés sur le chronogramme de la Figure 6.3.15 et de la Figure 6.3.16.



a) Avant suintement

.....▶ Eau vapeur  
 —▶ Eau liquide



b) Après apparition d'eau liquide dans les jeux (suintement)

Figure 6.3.14 Schéma de la resaturation d'une alvéole de déchets B. Évolution des écoulements de l'eau avant et après suintement dans les jeux de mise en place. Zoom sur les empilements de colis

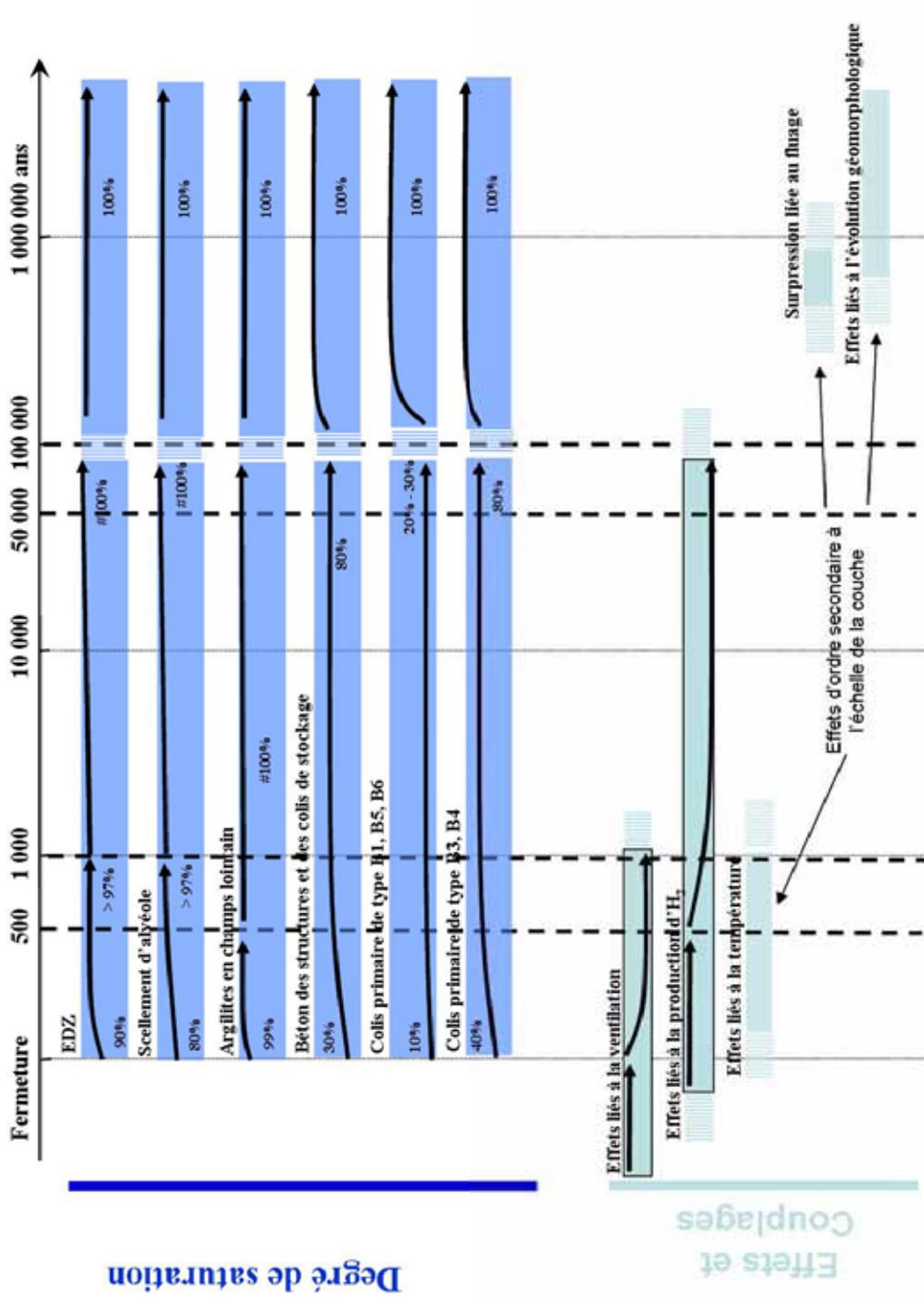


Figure 6.3.15 Chronogramme donnant l'état de saturation en eau des différents composants d'un module de stockage de déchets B, et les effets et couplages associés (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage)

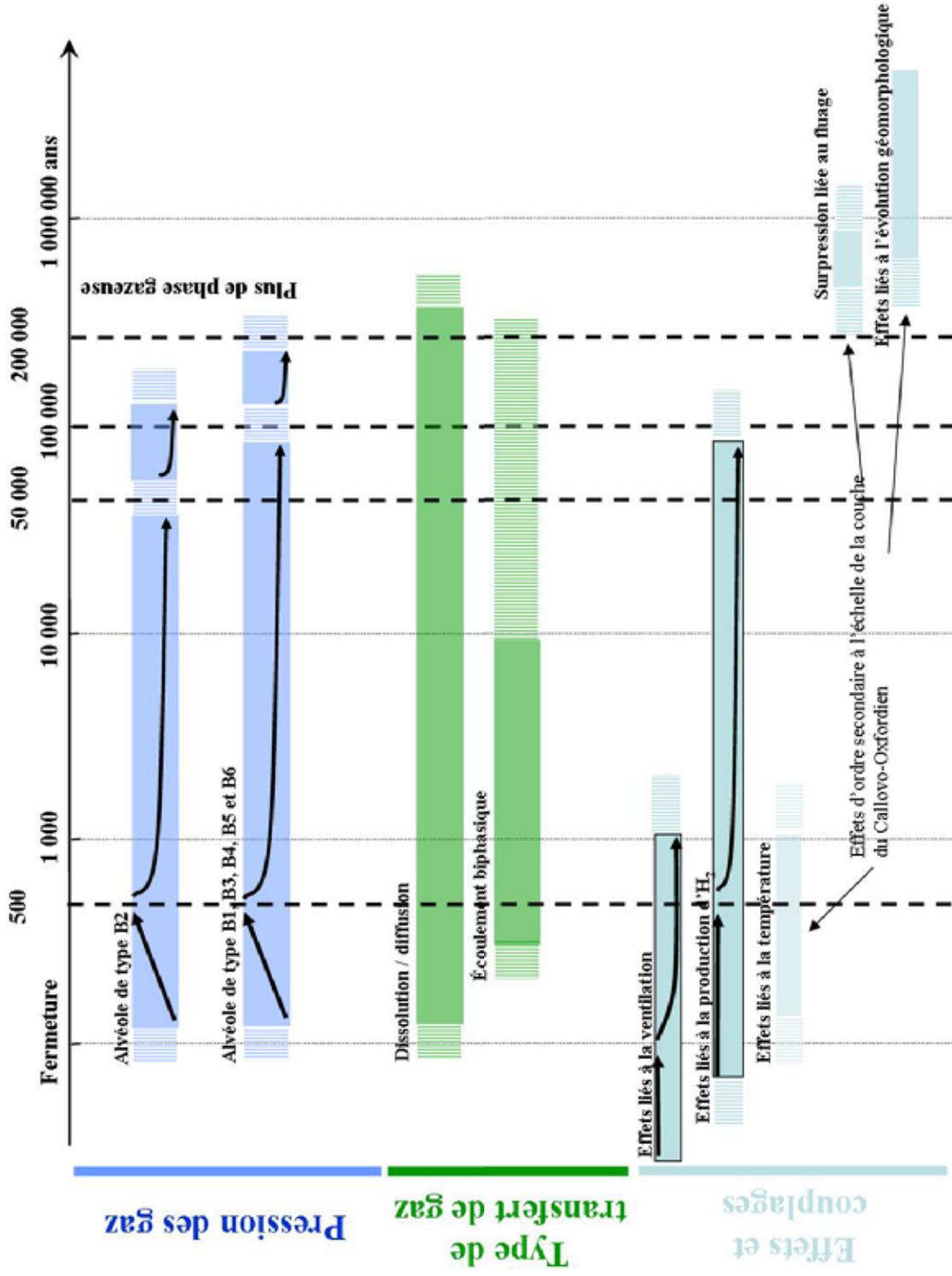


Figure 6.3.16 Chronogramme donnant la pression d'hydrogène dans les différents composants d'un module de stockage de déchets B, et les effets et couplages associés (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage)

● **Les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés**

L'intérieur du chemisage ne se corrode pas tant que celui-ci reste étanche, soit durant de l'ordre de 1 000 à 1 500 ans (cf. § 8). Durant cette période la partie interne au chemisage et les conteneurages se corrodent très peu. Après la rupture du chemisage, la corrosion de ces conteneurages est alors initiée. Leur perte d'étanchéité est atteinte à 4 000 ans pour les déchets C et 10 000 ans pour les combustibles usés. Les produits de corrosion expansifs remplissent progressivement les vides au sein des colis. Néanmoins, du fait de la production d'hydrogène, ces vides ne sont pas totalement saturés en eau. La saturation en eau à l'intérieur des colis augmente progressivement sur quelques milliers d'années. Cet état reste constant sur environ une dizaine de milliers d'années jusqu'à ce que la production d'hydrogène ait suffisamment diminué pour que la dissolution et la diffusion de l'hydrogène deviennent dominantes. Dès lors, la pression de gaz baisse progressivement dans l'alvéole. La resaturation complète de l'intérieur des colis ( $S = 100\%$ ) s'amorce et est atteinte en plusieurs dizaines de milliers d'années au minimum.

Les différents temps caractéristiques de l'évolution hydraulique des composants des alvéoles de combustibles usés sont rappelés sur les chronogrammes de la Figure 6.3.17 et de la Figure 6.3.18.

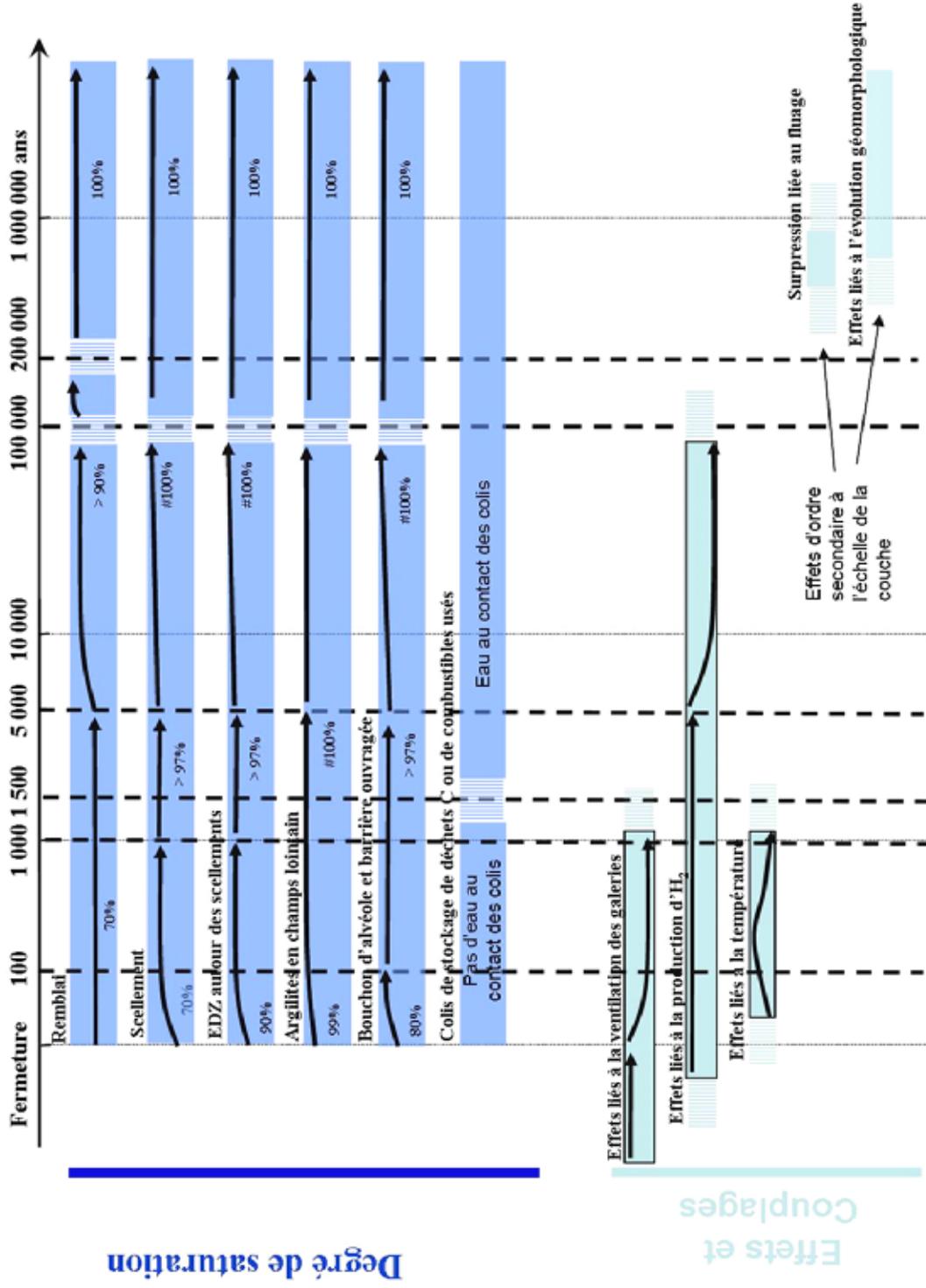


Figure 6.3.17 Chronogramme donnant l'état de saturation en eau des différents composants d'un module de stockage de déchets C ou d'un module de combustibles usés (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage)

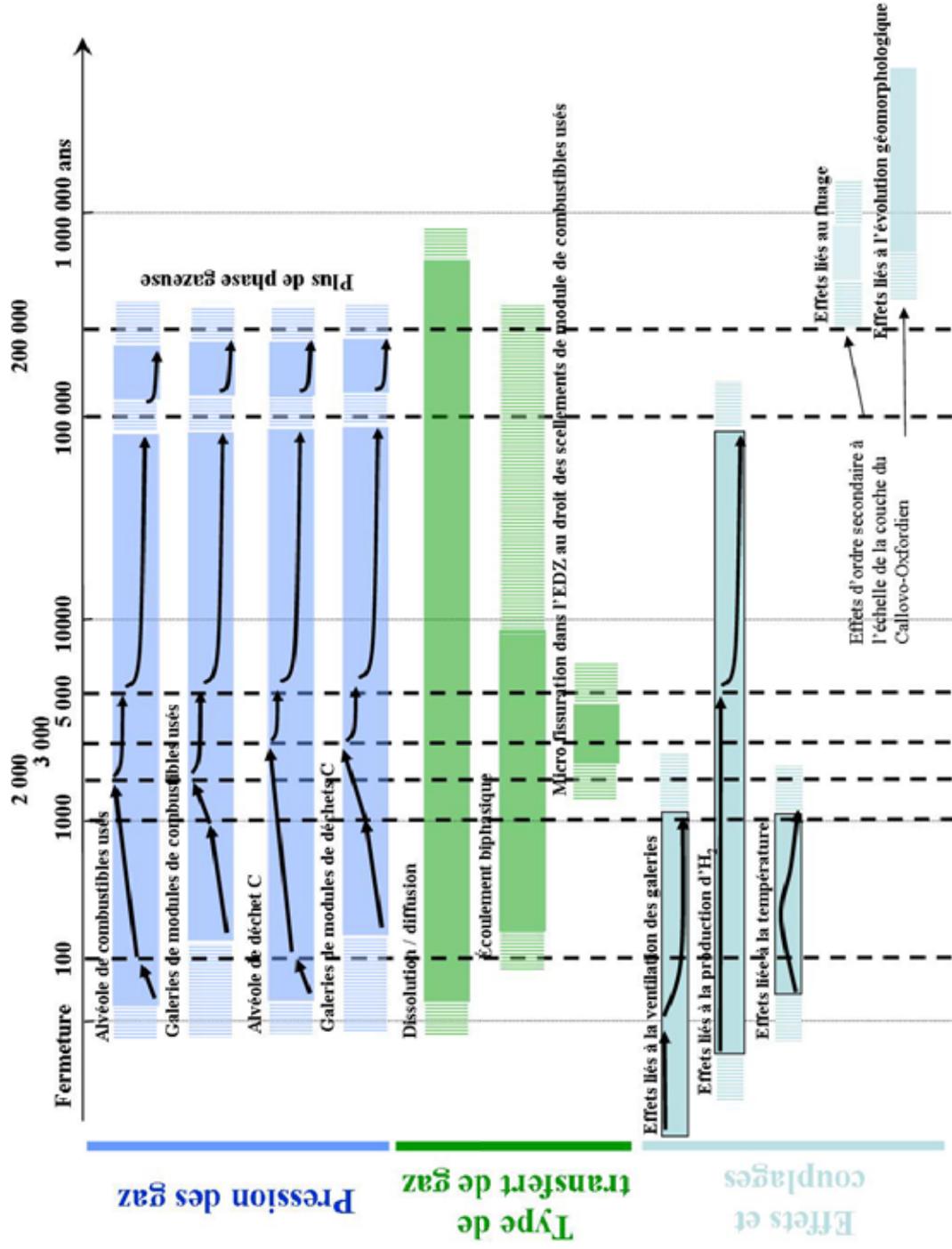


Figure 6.3.18 Chronogramme donnant la pression d'hydrogène dans les différents composants d'un module de stockage de déchets C ou d'un module de combustibles usés (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / fermeture / stockage)

### 6.3.3 Le transport des solutés dans le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'au retour à un nouvel équilibre hydraulique

À l'état initial, la diffusion est le mode de transfert dominant des solutés dans le Callovo-Oxfordien (§ 3.3.1.7). Les chapitres précédents montrent que les écoulements dans le stockage atteignent un état d'équilibre au-delà de 200 000 ans. Dans l'intervalle, des phénomènes transitoires existent qui induisent des variations des flux d'eau et de leurs directions dans le stockage et dans le Callovo-Oxfordien. Ces modifications sont susceptibles d'influencer les conditions et les directions de transport des solutés dans et autour du stockage.

À l'échelle de la couche géologique du Callovo-Oxfordien, on peut distinguer quatre stades temporels pour décrire l'influence hydraulique du stockage.

- Un premier stade durant lequel l'hydrogène produit par corrosion n'a pas d'effet sensible sur les écoulements. Ce stade inclut la période d'exploitation et quelques centaines d'années au plus après fermeture du stockage. Au début de ce stade, au niveau des galeries et des alvéoles de déchets B, les argilites sont fortement désaturées dans la zone fracturée de l'EDZ et les écoulements sont alors globalement convergents vers ces ouvrages. Les valeurs des gradients de charge hydraulique induits peuvent être très sensiblement supérieures à celles des gradients naturels. Concernant les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés, cette phase est marquée par la saturation des barrières ouvragées.
- Un deuxième stade qui regroupe la phase de montée en pression (jusqu'à 2 000 ans) et celle aboutissant à la dissipation de la surpression dans le Callovo-Oxfordien. Ce stade dure au maximum 10 000 ans. Il est caractérisé par la mise en pression du Callovo-Oxfordien en champ proche. Pendant 4 000 à 5 000 ans environ s'instaurent des écoulements divergents du stockage. Les gradients hydrauliques créés dans la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche peuvent atteindre des valeurs de  $20 \text{ m.m}^{-1}$  au maximum en champ très proche (4 à 5 m) des zones de stockage des combustibles usés et de  $6 \text{ m.m}^{-1}$  pour les zones de déchets B et C. Au-delà de ces quelques mètres, les surpressions créées dans le Callovo-Oxfordien sont faibles et systématiquement inférieures à 0,5 MPa et, pour les zones B et C en particulier, inférieures à 0,1 MPa. En terme de transfert des solutés, le nombre de Péclet moyen - calculé entre le stockage et le toit du Callovo-Oxfordien - est au maximum pour les anions de 1,6 (pour les combustibles usés), de sorte qu'il y a codominance entre diffusion et convection. Pour les cations, les nombres de Péclet moyens calculés sont toujours inférieurs à 1. Pour les zones de déchets B et C, les nombres de Péclet calculés pour les anions sont au plus égaux à 1 (Encadré 3.8). Toutefois, les gradients hydrauliques liés à l'hydrogène chutent suffisamment en quelques centaines d'années pour que la diffusion redevienne très vite dominante. Ces gradients disparaissent complètement après 9 000 ans pour les combustibles usés, 7 000 ans pour les déchets C et quelques milliers d'années pour les déchets B. La surpression hydraulique due à l'hydrogène n'aurait donc aucun effet sur les radionucléides qui seraient relâchés en solution par les colis de combustibles usés du fait de la durée d'étanchéité des conteneurs d'au moins 10 000 ans. La durée d'étanchéité pour les surconteneurs de déchets C est de 4 000 ans. L'analyse phénoménologique (cf. § 7 et 8) montre néanmoins que l'intégrité des surconteneurs pourrait être maintenue sur plus de 10 000 ans. Dans ces conditions, et comme pour les combustibles usés, aucun radionucléide ne serait relâché au cours de la période marquée par l'existence d'une surpression hydraulique. En considérant une durée d'étanchéité de 4 000 ans, la surpression hydraulique due à l'hydrogène a déjà commencé à décroître au moment du relâchement des radionucléides et la décroissance s'accroît plus encore après 5 000 ans. Dans ces conditions, le transfert des radionucléides relâchés par les colis de déchets C à 4 000 ans serait affecté par la surpression d'hydrogène. Toutefois, sur la période de 3 000 ans maximum entre le début du relâchement (après 4 000 ans) et la fin de la surpression (avant 7 000 ans), la distance de transfert des radionucléides relâchés ne serait augmentée que de quelques dizaines de centimètres au maximum.

Le transport des solutés resterait donc globalement diffusif dominant à l'échelle de toute la couche du Callovo-Oxfordien, et le stockage ne constitue pas une voie de transfert significative pour les radionucléides en solution. Plus particulièrement pour les alvéoles de déchets B, leur état non totalement saturé contribue à limiter ou empêcher tout relâchement et transfert des radionucléides en solution pendant toute cette période.

- Une troisième phase, correspondant à l'évacuation progressive de l'hydrogène par dissolution et diffusion. Les écoulements sont alors convergents vers le stockage et très limités jusqu'à ce que la saturation totale soit atteinte (200 000 ans pour  $S > 97\%$  dans les remblais). Les valeurs des gradients hydrauliques sont globalement faibles.
- La quatrième phase se caractérise par la mise en place d'un nouvel état d'équilibre hydraulique avec des gradients hydrauliques dans le stockage et dans le Callovo-Oxfordien similaires à ceux prévalant à l'état initial. C'est au cours de cette phase que commencent à se faire sentir les effets liés à l'évolution géodynamique. Les gradients hydrauliques verticaux à travers le Callovo-Oxfordien peuvent doubler en certains endroits de la zone de transposition suite à l'érosion et à l'incision des vallées. Néanmoins, la diffusion reste largement dominante dans les argilites du Callovo-Oxfordien.

Un effet transitoire lié à la charge thermique peut également avoir des conséquences sur les conditions de transfert des solutés.

- L'élévation de température entraîne une diminution de la densité de l'eau impliquant une surpression hydraulique dans le Callovo-Oxfordien autour des zones de déchets exothermiques. Les valeurs des gradients de charge induits peuvent être sensiblement supérieures à celles liées aux écoulements naturels, notamment au droit des alvéoles de combustibles usés. La durée de cette surpression est cependant limitée à la période d'augmentation de la température dans les argilites, soit quelques centaines d'années. Sur cette période de temps, aucun radionucléide n'est relâché par les colis de déchets C et les colis de combustibles usés du fait de leurs périodes d'étanchéité respectives d'au moins 4 000 ans et 10 000 ans. Toutefois, on notera que la distance supplémentaire parcourue par les solutés soumis à cet effet dans le Callovo-Oxfordien serait au maximum de l'ordre du centimètre. En outre, la surpression hydraulique liée à la charge thermique ne se superposerait pas aux surpressions créées par l'hydrogène, car elle aura disparu lorsque cette dernière devient significative.
- Les gradients thermiques élevés en champ proche du stockage impliquent en paroi des alvéoles de combustibles usés un effet Soret sensible pendant quelques dizaines d'années. Comme pour la surpression hydraulique liée à l'élévation de température, les radionucléides ne seraient pas concernés par cet effet, puisqu'ils ne sont relâchés par les colis de déchets qu'à partir d'au moins 4 000 ans pour les déchets C et 10 000 ans pour les combustibles usés. En outre, cet effet n'augmenterait pas significativement la distance du transport d'un soluté par rapport à celle en diffusion pure (Coelho, 2005).
- La charge thermique, existant pendant plusieurs dizaines de milliers d'années au droit des alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés, induit des augmentations conjointes du coefficient de diffusion et de la perméabilité à l'eau. La diffusion reste néanmoins dominante. Du fait de l'augmentation du coefficient de diffusion durant cette période, la distance parcourue par diffusion est augmentée par rapport à celle à la température géothermale initiale, mais l'augmentation de la distance serait au plus de quelques mètres.

### 6.3.4 Conclusion

En conclusion, on retiendra les éléments suivants.

- À l'échelle Callovo-Oxfordien les influences du stockage, aussi bien thermique qu'hydraulique, ne modifient donc pas le caractère dominant de la diffusion sur les autres modes de transport (Figure 6.3.19). Des codominances entre diffusion et convection ayant pour origine les différents processus évoqués ci-dessus pourraient exister sur des périodes au maximum de quelques milliers d'années et principalement en champ proche. Elles concerneraient essentiellement les zones de déchets C et les zones de combustibles usés et leurs paroxysmes interviendraient avant la perte d'étanchéité des conteneurages.

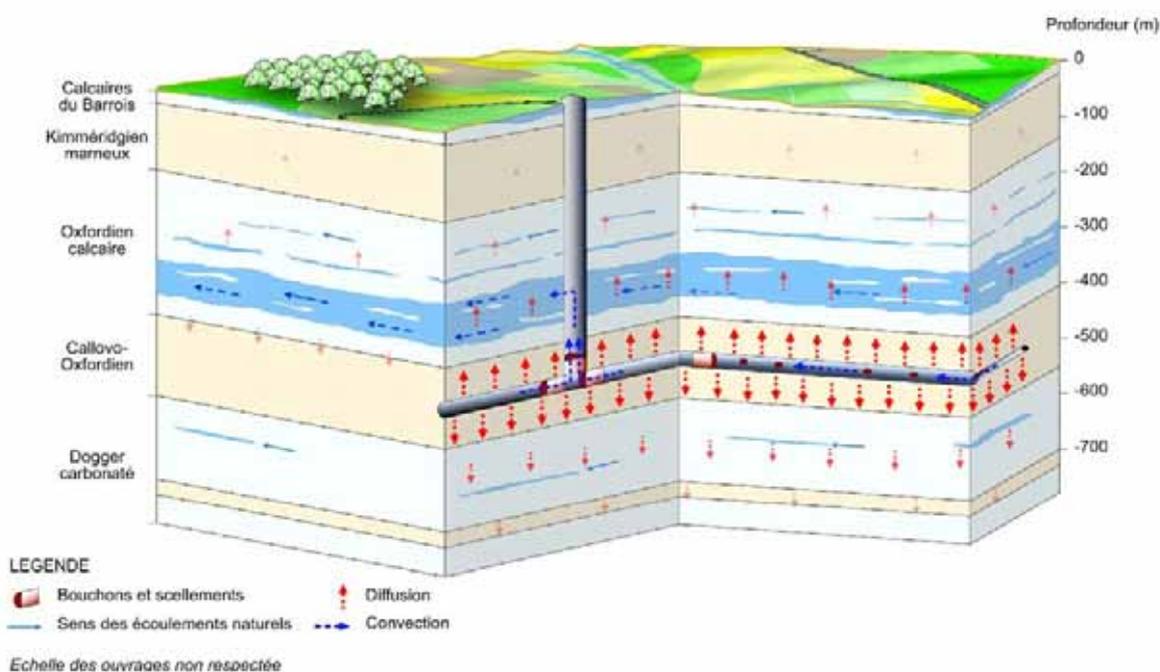


Figure 6.3.19 Schéma des modes de transport des solutés à l'échelle du Callovo-Oxfordien et de ses encaissants sur le site de Meuse/Haute-Marne, après retour à l'équilibre hydraulique

- À l'intérieur du stockage, la diffusion reste globalement dominante quelles que soient les phases évoquées plus haut. Lors de la montée en pression de l'hydrogène dans les galeries, une composante de transport convectif très transitoire pourrait se mettre en place. Toutefois, en raison de l'état non totalement saturé des remblais ( $S = 70$  à  $80\%$ ) et de la géométrie des galeries (grande longueur et faible diamètre), cette composante convective resterait faible par rapport à la diffusion et la dispersion radiale vers le Callovo-Oxfordien (Figure 6.3.20).
- Plus spécifiquement, à l'intérieur des alvéoles de stockage :

Dans les alvéoles de déchets B, on notera l'existence d'un état non saturé dans les bétons ( $S < 80\%$ ) et dans les colis de stockage, certains pouvant même atteindre des degrés de saturation de l'ordre de 20 à 30 % (par exemple les B5). À cela s'ajoute l'effet des jeux de mise en place qui resteraient dans un état peu saturé (20 à 30 %). Cet état non saturé du à l'hydrogène de corrosion peut perdurer dans certains cas jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'années, la saturation totale des colis étant généralement atteinte au-delà de 100 000 ans. Dans ces conditions, le transport des solutés hors des colis de stockage et des alvéoles est très limité au cours de cette période.

Pour les déchets B légèrement exothermiques (B5 et B2), le champ de température créé n'est pas suffisant pour produire un effet Soret sensible. De même, le gradient hydraulique créé par la surpression due à la charge thermique dans le Callovo-Oxfordien au droit des alvéoles contenant ces déchets, ne remettrait pas en cause la dominance de la diffusion sur la convection. En outre, la diffusion est augmentée d'un facteur 3 au plus fort du champ thermique, quelques dizaines d'années après la fermeture. L'influence du champ thermique décroît au cours du temps et devient négligeable quelques centaines d'années après la fermeture. À l'échelle de cette période de temps, la distance supplémentaire parcourue par rapport à une diffusion à la température géothermale est de l'ordre du mètre pour les anions.

Dans les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés, un degré de saturation élevé est atteint en une centaine d'années ( $S > 97\%$  au niveau des bouchons et de la barrière ouvragée pour les combustibles usés) malgré la production d'hydrogène. La pression d'hydrogène est homogène au sein des alvéoles et n'influence donc pas le transport des solutés au sein des alvéoles. En outre, pour les combustibles usés, le relâchement des radionucléides n'interviendrait qu'après la période d'influence significative de l'hydrogène sur les écoulements d'eau et le transport des solutés dans et autour des alvéoles. Les colis étant fortement exothermiques ils provoquent à la fois un effet Soret et une surpression hydraulique qui augmente le terme de transport convectif. À ces deux effets s'ajoute une augmentation de la diffusion d'un facteur 6 à 7 au plus fort du champ thermique, quelques années après la mise en place des colis. Ainsi, malgré l'effet Soret et la surpression hydraulique, la diffusion reste dominante pendant cette période. L'effet Soret s'estompe avec l'homogénéisation des températures au sein de l'alvéole au bout de quelques dizaines d'années, la surpression hydraulique perdure quelques centaines d'années et la diffusion reste significativement influencée par le champ thermique pendant au plus mille ans pour les déchets C et au plus quelques milliers d'années pour les combustibles usés.

- Dans les galeries, pendant la toute première phase de 2 000 à 3 000 ans de migration de l'hydrogène dans ces ouvrages, un déplacement d'eau pourrait se produire. Compte tenu de la présence des scellements et de la géométrie des galeries, la composante longitudinale de ce phénomène serait très limitée. Ensuite, le champ de pression de gaz dans les galeries sera quasi homogène et ne conduira pas à de tels déplacements. De plus, le remblai des galeries n'étant pas totalement saturé ( $S = 70\%$ ) lors de ce phénomène précoce (2 000 – 3 000 ans après fermeture), les vitesses convectives de transport de solutés resteraient faibles en particulier au regard de la diffusion.

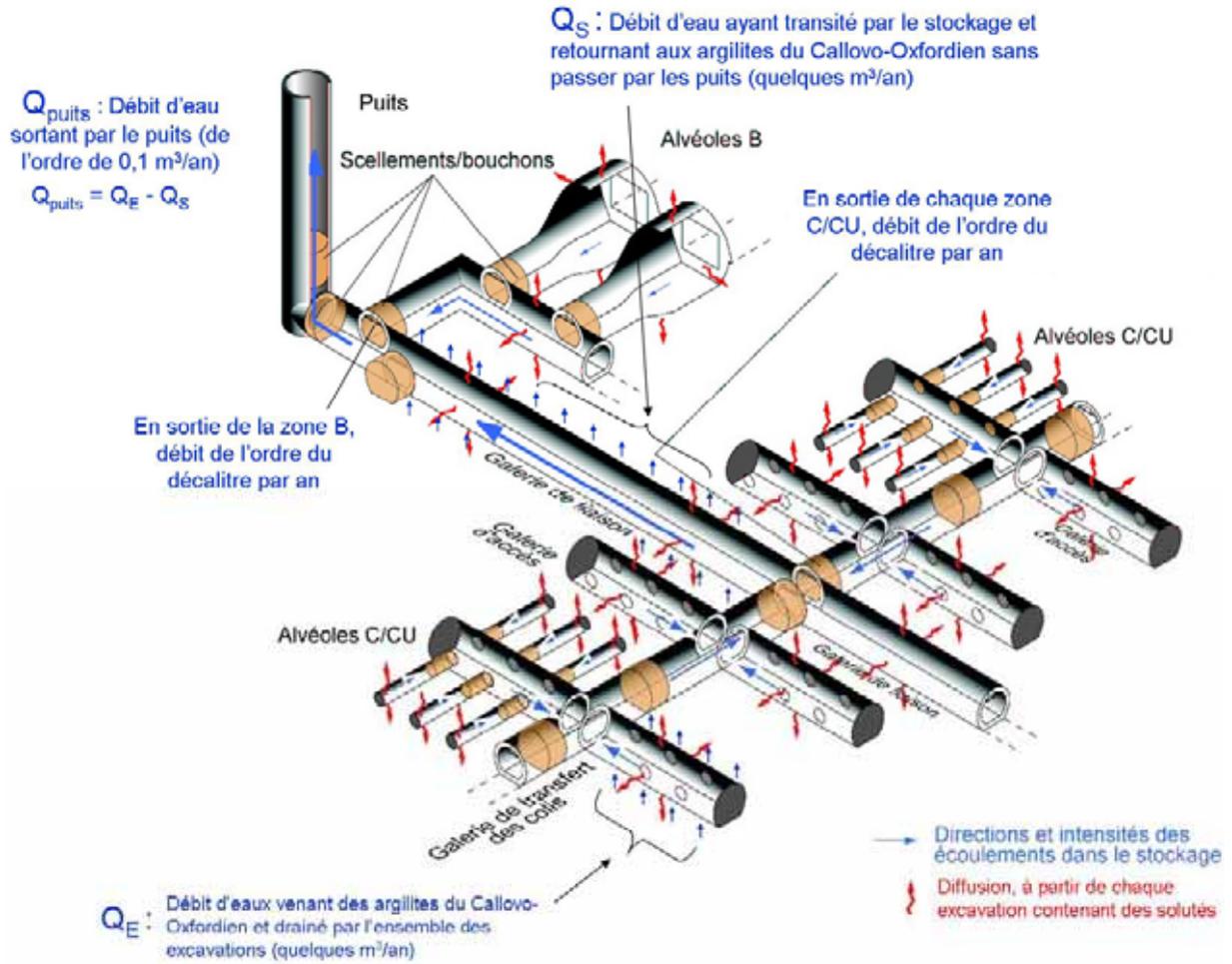


Figure 6.3.20 Représentation schématique des débits d'eau transitant par le stockage et des modes de migration des solutés dans le stockage, après retour à l'équilibre hydraulique

## 6.4 Synthèse sur les écoulements et le transfert en solution et sous forme gazeuse

### 6.4.1 Un cadre pour les évolutions chimique et mécanique du stockage, puis le relâchement et le transfert des radionucléides

L'évolution des écoulements dans le stockage et son environnement géologique contribue à définir le cadre des évolutions chimique et mécanique, donc celui de la dégradation des colis de déchets et *in fine* celui du relâchement des radionucléides par les colis de déchets. Enfin, en association avec l'évolution chimique, elle détermine la mobilité des radionucléides relâchés et leur transfert vers la biosphère.

1. L'initiation des processus chimiques nécessite la présence d'eau. Leur propagation dans le temps et l'espace est alors fonction de l'hydrodynamique (*i.e.* flux d'eau) et/ou des quantités de réactifs susceptibles d'être transportées par les flux d'eau ou de se déplacer par diffusion dans l'eau.
2. Le comportement mécanique des composants du stockage et des argilites dépend aussi de l'eau. Cette dépendance peut être directe, comme par exemple pour les argilites (notamment l'EDZ), les bouchons d'alvéole ou les scellements, dont la plasticité et le comportement à la rupture dépendent de leur état de saturation. Elle peut aussi être indirecte via les processus chimiques, comme par exemple la corrosion qui modifie la résistance mécanique des composants en acier du stockage.
3. Le relâchement des radionucléides résulte principalement de la dégradation chimique et mécanique des colis de déchets, donc indirectement de l'hydraulique du stockage. Après leur relâchement, le devenir des radionucléides dépend pour partie de l'écoulement de l'eau et des conditions de transport des solutés dans le stockage, puis dans la couche du Callovo-Oxfordien, et enfin dans les formations encaissantes.

Les paragraphes suivants dégagent les faits marquants de l'évolution hydraulique, nécessaires à la description des évolutions chimique et mécanique, et *in fine* du relâchement et du transfert des radionucléides.

### 6.4.2 Deux moteurs spécifiques pour les écoulements

À l'actuel (*i.e.* avant la réalisation du stockage), les formations géologiques sont à l'équilibre hydraulique sur le site de Meuse/Haute-Marne et de manière plus étendue sur toute la zone de transposition. Sur la majorité de cette zone, l'écoulement est ascendant du Dogger calcaire vers l'Oxfordien carbonaté avec des gradients de l'ordre de  $0,2 \text{ m.m}^{-1}$  au maximum. Cette configuration a été prise en référence pour l'ensemble de l'analyse des écoulements. On notera néanmoins qu'à l'aplomb de la position de référence du laboratoire, ainsi qu'au Sud-Est de la zone de transposition, l'écoulement d'eau est vertical descendant. Compte tenu de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien, cet écoulement d'eau est faible, de l'ordre du dixième de millilitres d'eau par an et par mètre carré, ce qui correspond à une vitesse d'écoulement de l'eau de l'ordre de quelques décimètres par million d'années. Dans ce contexte de très faible écoulement, et à l'échelle de la couche du Callovo-Oxfordien, le transport des solutés s'effectue majoritairement par diffusion.

Dans l'Oxfordien carbonaté et le Dogger calcaire, les écoulements d'eau en aval de la position de référence du laboratoire sont principalement horizontaux. Les perméabilités de ces formations sont plus importantes que celle du Callovo-Oxfordien, de l'ordre de  $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$  à  $10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ , de sorte que la convection contribue significativement au transport des solutés jusqu'à des exutoires locaux au niveau des vallées lorsque les encaissants affleurent. Une partie des écoulements suit cependant une trajectoire régionale globalement orientée Nord-Ouest en aval de la position de référence du laboratoire.

Partant de l'état d'équilibre hydraulique actuel, l'évolution des écoulements dans le stockage et son environnement géologique au cours du prochain million d'années, est marquée par deux grandes phases successives dont les origines sont respectivement :

- **les perturbations hydrauliques engendrées par le stockage lui-même**, notamment la désaturation des argilites en champ proche du stockage pendant la phase d'exploitation et la production d'hydrogène par corrosion des métaux après fermeture des alvéoles de stockage ;
- **les évolutions géodynamiques** dont les effets deviennent significatifs après quelques centaines de milliers d'années. Il s'agit particulièrement des changements progressifs de la morphologie de surface, qui conduisent à une modification des écoulements dans les encaissants du Callovo-Oxfordien, en particulier dans l'Oxfordien carbonaté.

#### **6.4.2.1 Les perturbations hydrauliques engendrées par le stockage : un transitoire affectant principalement le stockage et le Callovo-Oxfordien**

La forte épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien et sa très faible perméabilité contribuent à limiter l'extension spatiale des perturbations hydrauliques engendrées par le stockage. Celles-ci sont principalement circonscrites au stockage et à la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche, et couvrent une période de l'ordre de 200 000 ans au terme de laquelle un nouvel état d'équilibre hydraulique s'est installé. Le stockage est alors totalement saturé ( $S > 97\%$  dans les galeries).

La durée des perturbations hydrauliques engendrées par le stockage doit être comparée à la durée d'autres processus tels que :

- le transfert par diffusion des solutés dont la durée moyenne est plusieurs centaines de milliers d'années dans la couche du Callovo-Oxfordien ,
- la dégradation chimique des bétons dont la durée est de plusieurs centaines de milliers d'années,
- l'évolution des écoulements dans les encaissants sous l'effet de la géodynamique qui s'inscrit sur le million d'années et ne devient significative qu'au-delà de 300 000 ans.

#### **6.4.2.2 Les effets hydrauliques liés à la géodynamique : une évolution continue sur le million d'années affectant principalement les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien**

Les évolutions géodynamiques sur le prochain million d'années se traduisent principalement par une érosion progressive des terrains en surface. Leurs effets hydrauliques concernent principalement les formations géologiques sus-jacentes à la couche du Callovo-Oxfordien. Ils deviennent significatifs à partir de 300 000 à 500 000 ans, c'est-à-dire après que les perturbations hydrauliques engendrées par le stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien se sont estompées. Les évolutions géodynamiques et leurs effets hydrauliques se poursuivent ensuite sur le prochain million d'années.

#### **6.4.3 L'évolution hydraulique du stockage : l'implication de différents processus jusqu'au retour à un nouvel état d'équilibre hydraulique**

Les perturbations hydrauliques engendrées par le stockage sont multiples. Elles sont liées chronologiquement dans le temps à l'enchaînement des opérations de réalisation, d'exploitation et de fermeture du stockage, puis à la production d'hydrogène par corrosion des composants métalliques du stockage, et enfin au comportement mécanique des argilites (fluage) vis-à-vis des ouvrages du stockage.

L'exploitation et l'architecture modulaire du stockage, associées à une durée d'ouverture des ouvrages d'ordre séculaire à pluriséculaire (qui reste petite par rapport au temps d'interaction hydraulique au sein du Callovo-Oxfordien (Encadré 4.1), rendent quasi indépendantes les évolutions hydrauliques des

zones de stockage, et similaires celles des modules et des alvéoles d'une même zone. Par conséquent, l'histoire hydraulique du stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien qui l'environne peut être résumée chronologiquement comme suit pour l'ensemble du stockage.

1. La décharge hydraulique autour de l'ensemble des ouvrages dans les formations géologiques traversées (encaissants sus-jacents et Callovo-Oxfordien), pendant la période de réalisation et d'exploitation du stockage.
2. L'introduction permanente d'air, et donc d'O<sub>2</sub> et de CO<sub>2</sub>, dans les ouvrages ventilés (galeries, puits et *pro parte* alvéoles de déchets B) pendant la période de réalisation et d'exploitation du stockage.
3. La désaturation du Callovo-Oxfordien au pourtour immédiat des ouvrages ventilés pendant la période de réalisation et d'exploitation du stockage, permettant ainsi l'entrée d'oxygène dans les argilites (initialement réductrices avant la réalisation du stockage).
4. Au delà de la zone désaturée, la mise en charge hydraulique transitoire du Callovo-Oxfordien autour des zones de stockage de déchets exothermiques (C, combustibles usés et *pro parte* B) du fait de l'élévation de température.
5. Après fermeture des ouvrages (*i.e.* du stockage), leur resaturation progressive et celle des argilites du Callovo-Oxfordien qui auraient été désaturées à leur pourtour pendant la période d'exploitation. Cette resaturation est couplée à la production et au transfert d'hydrogène issu de la corrosion des composants métalliques (principalement présents dans les alvéoles de stockage), ce qui retarde le retour à la saturation complète par rapport à une resaturation sans gaz.
6. Le retour à un état saturé de la totalité du stockage avec l'évacuation progressive de l'hydrogène par la couche du Callovo-Oxfordien et/ou par le stockage vers l'Oxfordien carbonaté.
7. La faible mise en charge hydraulique transitoire des ouvrages, une fois qu'ils sont saturés, par le lent fluage des argilites à leur pourtour.
8. Le retour à un état d'équilibre hydraulique du stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien. Cet état est piloté par les champs de charge dans l'Oxfordien carbonaté et le Dogger calcaire, et les perméabilités des différents ouvrages du stockage, notamment les scellements de galeries et de puits.

#### **6.4.3.1 L'impact hydraulique du stockage dans les encaissants supérieurs : un phénomène local et limité à quelques siècles ou quelques milliers d'années.**

Les puits sont étanches au passage du Tithonien, de sorte qu'ils n'ont pas d'impact hydraulique sur cette formation. Les écoulements dans les autres formations encaissantes, Kimméridgien marneux et Oxfordien carbonaté, sont suffisamment faibles pour ne pas nécessiter une étanchéité des puits à leur passage durant la phase d'exploitation. L'absence d'étanchéité provoque ainsi une décharge hydraulique dans ces formations, ainsi qu'une éventuelle désaturation, suivant leurs propriétés hydrauliques.

- La décharge hydraulique est limitée dans le Kimméridgien marneux. Les faibles débits d'eau dans cette formation permettent sa désaturation partielle, de l'ordre de 10 à 20 %, et progressive autour des puits par l'air de ventilation. L'extension de la zone désaturée est au plus de quelques dizaines de mètres radialement à l'axe des puits. Le degré de saturation du soutènement en béton est de l'ordre de 30 % à 40 %.
- La décharge hydraulique est plus importante dans l'Oxfordien carbonaté. La diminution des pressions d'eau est de l'ordre de quelques MPa sur des distances radiales plurihectométriques aux puits. Durant la période séculaire d'exploitation du stockage, les décharges autour de chacun des puits se rejoignent et créent une décharge globale dont l'extension atteint quelques kilomètres environ au bout de quelques dizaines d'années puis évolue peu. Les débits d'eau dans les différents horizons poreux sont suffisamment élevés pour empêcher une désaturation par l'air de ventilation circulant dans les puits.

Après la fermeture du stockage, le scellement des puits dans la couche du Callovo-Oxfordien et les débits d'eau dans les horizons poreux permettent un retour à l'équilibre hydraulique en quelques siècles dans l'Oxfordien carbonaté. Dans le Kimméridgien marneux, ce retour est un peu plus long, de l'ordre de plusieurs milliers d'années.

La perturbation hydraulique engendrée par les puits sur les encaissants sus-jacents est donc un phénomène local, réversible et très transitoire.

#### **6.4.3.2 La désaturation du Callovo-Oxfordien au pourtour des ouvrages ventilés pendant l'exploitation du stockage : un processus limitant les évolutions chimiques et le fluage des argilites en champ proche**

Les galeries, les puits et les alvéoles de déchets B sont ventilés pendant tout ou partie de la période d'exploitation du stockage. L'air non saturé en vapeur d'eau de la ventilation provoque une désaturation des argilites à leur pourtour, qui se combine à la décharge hydraulique (qui progresse dans les argilites pour atteindre une extension de quelques dizaines de mètres au plus). À l'inverse, l'absence de ventilation et la pose rapide d'un capot d'étanchéité en tête des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés empêchent une désaturation des argilites à leur pourtour.

Dans les galeries et les puits, la désaturation affecte la totalité des infrastructures en béton et de l'EDZ initiale en quelques années. Un régime pseudo - stationnaire s'établit avec de très faibles débits d'eau convergents vers les ouvrages. La désaturation se propage ensuite très lentement pour atteindre les argilites saines ( $S > 97\%$  quelques mètres au-delà de l'EDZ) à la fin de l'exploitation. Les degrés de saturations des infrastructures en béton et de la zone fracturée de l'EDZ s'établissent respectivement à environ 20 % à 30 %, et à 30 % à 40 %. Le degré de saturation croît progressivement dans la zone microfissurée vers les argilites saines qui restent saturées au-delà de quelques mètres de l'EDZ. Autour des alvéoles de déchets B, l'extension de la désaturation reste limitée à l'EDZ. Comme pour les infrastructures en béton, les colis de stockage de déchets B sont fortement désaturés.

La période d'exploitation peut donc être considérée comme une période « sèche » pour les ouvrages ventilés. Les processus chimiques sont alors (très) limités, notamment la dégradation des bétons d'infrastructure et des colis de stockage de déchets B. Sur le plan mécanique, l'état non saturé de tout ou parti de la zone endommagée des argilites tend à ralentir ou à arrêter le fluage des argilites. Ces points sont développés respectivement dans les chapitres 7 et 8.

#### **6.4.3.3 La resaturation du stockage après fermeture, la production et le transfert de l'hydrogène de corrosion : des processus couplés**

La fermeture des ouvrages du stockage initie le processus de resaturation du stockage par les eaux des argilites. Les scellements des puits et des galeries d'accès principales empêchent la resaturation des zones de stockage et des galeries de liaison par les eaux de l'Oxfordien carbonaté ou des autres formations sus-jacentes. Compte tenu de la faible perméabilité des argilites, la resaturation est un processus intrinsèquement lent. Il rentre en compétition avec la production de l'hydrogène de corrosion, qui, elle-même, dépend de la présence d'eau.

Les vitesses de corrosion sont faibles, au maximum de l'ordre de quelques micromètres par an (voire plus probablement d'un à quelques dixièmes de micromètre par an). Malgré ces faibles vitesses de corrosion, le transfert par dissolution et diffusion de l'hydrogène dans l'eau peut ne pas être suffisant pour évacuer en continu l'hydrogène produit pendant les premiers milliers d'années. Les travaux expérimentaux menés à ce jour sur des échantillons d'argilites et en forage permettent d'apprécier les propriétés de transfert des gaz dans les argilites, et de proposer une représentation du devenir de l'hydrogène produit dans les alvéoles de stockage.

L'évacuation lente et progressive de l'hydrogène est dominée par les transferts (i) par écoulement biphasique depuis le stockage vers la couche du Callovo-Oxfordien et à l'intérieur du stockage depuis les alvéoles de stockage vers les galeries et (ii) par dissolution-diffusion dans la couche du Callovo-Oxfordien. Dans le cas des combustibles usés, un transfert transitoire par microfissuration localisée au niveau des bouchons d'alvéoles et des scellements de modules est envisagé.

Le transfert biphasique de l'hydrogène dans la couche du Callovo-Oxfordien sain n'entraîne pas de désaturation ( $S > 97\%$  en champ proche et  $S > 99\%$  en champ lointain). Pendant la phase de production (jusqu'à 4 000 – 5 000 ans), l'hydrogène est sous une pression de quelques MPa dans le stockage. Ceci implique en parois des excavations une augmentation transitoire de la pression de l'eau interstitielle des argilites, qui peut créer localement des écoulements d'eau divergents dans les argilites en champ proche (sur quelques mètres). Compte tenu des propriétés des argilites, les débits d'eau mis en jeu sont très faibles et les processus très lents. Au-delà de 10 000 ans, ces phénomènes disparaissent.

La représentation proposée conduit à une durée d'atteinte de la saturation totale du stockage de l'ordre 200 000 ans ( $S > 97\%$  dans les remblais). Plus particulièrement pour les alvéoles de déchets B, la production d'hydrogène conduirait au maintien d'un état non saturé des infrastructures et des colis de stockage, avec des degrés de saturation compris entre 50 % et 80 % dans les bétons d'infrastructure et plus faibles encore pour certains colis de stockage de déchets B. En revanche, les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés resteraient dans un état proche de la saturation ( $S > 97\%$ ) du fait des propriétés hydriques des argilites et de l'argile gonflante.

L'état non saturé des alvéoles de stockage de déchets B et des galeries a pour conséquence de limiter l'ensemble des processus chimiques. Sur le plan mécanique, la reprise du fluage des argilites autour des ouvrages est contrainte par la resaturation progressive de la zone endommagée.

#### **6.4.3.4 L'atteinte d'un nouvel état d'équilibre hydraulique après resaturation totale du stockage : la période de développement des processus chimiques et mécaniques dans le stockage**

Après saturation complète du stockage, la mise en charge mécanique des galeries par le fluage des argilites provoque de manière transitoire des surpressions qui restent faibles du fait des faibles vitesses de fluage à cette période (au-delà de 100 000 ans). Elles ne provoquent pas un écoulement d'eau significatif dans le stockage et se dissipent rapidement.

Après l'atteinte de la resaturation complète du stockage, un équilibre hydraulique se met en place dans le stockage et dans le Callovo-Oxfordien environnant. Latéralement au stockage, au-delà de quelques centaines de mètres, le champ de charge dans la couche du Callovo-Oxfordien n'est jamais affecté par le stockage et correspond au champ de charge naturel qui évolue sous l'effet de l'évolution géodynamique.

Au niveau du stockage et du Callovo-Oxfordien environnant, le champ de charge à l'équilibre et les écoulements sont déterminés par les perméabilités des différents composants du stockage, et en particulier celle des scellements. Bien que faibles, ces perméabilités sont plus élevées que celles de la couche du Callovo-Oxfordien, de sorte que le stockage joue un rôle de drain. Compte tenu du gradient naturel vertical ascendant dans le Callovo-Oxfordien depuis le Dogger calcaire vers l'Oxfordien carbonaté, le stockage draine une partie de l'écoulement ascendant venant du Dogger calcaire : un écoulement d'eau s'organise le long des ouvrages du stockage vers les puits. Compte tenu de la faible perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien et des scellements, le débit d'eau ainsi drainé par le stockage vers les puits est très faible, de l'ordre de quelques dizaines de litres par an.

C'est dans ce contexte hydraulique que s'effectuent les évolutions chimique et mécanique, et *in fine* le relâchement et le transfert des radionucléides, dans le stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien, jusqu'au million d'années.

#### **6.4.4 Un transport des solutés qui est dominé par la diffusion dans le Callovo-Oxfordien**

Le transitoire hydraulique du stockage, jusqu'au retour à un nouvel état d'équilibre hydraulique est marqué par une évolution significative des écoulements. Toutefois, les flux sont très faibles et la diffusion reste, à l'échelle de la couche, le mode de transport dominant excepté durant un court transitoire au cours duquel les surpressions liées à la production d'hydrogène sont susceptibles de créer de gradients suffisants à l'instauration d'une codominance convection - diffusion. Cet effet transitoire interviendrait très tôt (jusqu'à 5 000 ans au maximum après fermeture) et n'aurait pas de conséquence notable. De plus, avec des hypothèses moins pénalisantes, ce phénomène est susceptible d'être moins marqué.

#### **6.4.5 La production et la migration sous forme gazeuse de très faibles quantités de radionucléides**

Parmi l'ensemble des radionucléides, seul le  $^{14}\text{C}$  organique peut conduire à une forme gazeuse, en l'occurrence  $\text{CH}_4$ , dans les conditions du stockage pour autant qu'il y ait présence d'une activité bactérienne. Cela ne concernerait donc que les colis type B5.1, du fait de la présence de matière organique permettant éventuellement le développement bactérien. L'inventaire en  $^{14}\text{C}$  des B5.1 représenterait environ entre 19 % et 5,7 % de l'inventaire total en  $^{14}\text{C}$ , soit respectivement 75 moles à 20 moles. En outre, seuls 55 % à 85 % de ce total ( $^{14}\text{C}$  du zircaloy) serait sous forme organique. Dans les conditions standard (TPN), cela représenterait un volume de  $\text{CH}_4$  inférieur au  $\text{m}^3$ , donc très faible par rapport au volume d'hydrogène mis en jeu dans le stockage. On peut donc considérer comme négligeable l'impact du transfert de radionucléides sous forme gazeuse d'autant que les temps de transferts de plusieurs dizaines de milliers d'années jusqu'aux exutoires contribueront largement à leur décroissance radioactive

#### **6.4.6 Une modification significative de l'écoulement et du transport dans les encaissants avec l'évolution géodynamique sur le million d'années**

Les études menées sur les changements climatiques futurs dans l'hémisphère Nord montrent l'existence d'une succession de cycles glaciaires tous les 100 000 ans environ durant le prochain million d'années. Suivant la prise en compte ou non d'un effet anthropique, la date d'occurrence du prochain maximum glaciaire varie entre 100 000 ans et 600 000 ans, donc après la resaturation totale du stockage. Durant les maxima glaciaires, les glaciers ne s'installent pas aux latitudes du site de Meuse / Haute-Marne. Un pergélisol continu se met en place, sans toutefois atteindre la couche du Callovo-Oxfordien, mais il peut bloquer la recharge des formations encaissantes et diminuer les vitesses d'écoulement au sein de ceux-ci, notamment dans l'Oxfordien carbonaté. Sur le prochain million d'années, les cycles glaciaires et la surrection tectonique entraînent une érosion progressive qui devient significative à partir de 300 000 à 500 000 ans, avec l'enfoncement des vallées qui entaillent localement la série sédimentaire jusqu'à l'Oxfordien carbonaté, et l'abaissement du niveau des plateaux. À l'Est et au Sud du secteur, ces modifications de la topographie font reculer vers l'Ouest et le Nord-Ouest les zones d'affleurement correspondant aux aires de recharge des formations, et abaissent les charges hydrauliques dans les encaissants du Callovo-Oxfordien notamment l'Oxfordien carbonaté.

À partir de 300 000 à 500 000 ans, les évolutions géodynamiques modifient donc progressivement les directions d'écoulement dans les formations encaissantes sus-jacentes, et de manière moindre dans le Dogger calcaire. En particulier, la direction initiale d'écoulement régional s'estompe et des directions locales apparaissent avec de nouveaux exutoires locaux au niveau des vallées qui se creusent. Les

vitesse d'écoulement dans le Dogger calcaire et l'Oxfordien carbonaté restent néanmoins similaires à celles observées à l'actuel sur la zone de transposition.

Compte tenu de sa profondeur, la couche du Callovo-Oxfordien n'est pas directement affectée par l'érosion. L'écoulement de l'eau reste similaire à celui à l'état actuel, globalement vertical ascendant sur la zone de transposition. Le gradient de charge augmente jusqu'à  $0,3-0,4 \text{ m.m}^{-1}$ , du fait de la diminution des charges hydrauliques dans l'Oxfordien carbonaté tandis que les charges dans le Dogger calcaire évoluent moins et de façon plus uniforme, car les affleurements sont plus éloignés du stockage. Cette augmentation du gradient de charge dans la couche du Callovo-Oxfordien ne modifie pas le transport des solutés qui reste diffusif dominant.

Les échelles de temps des effets hydrauliques dus aux évolutions géodynamiques sont similaires à celles du transfert de radionucléides de la couche du Callovo-Oxfordien vers les encaissants. Ainsi, la période de 300 000 à 500 000 ans au bout de laquelle des concentrations en solution significatives de radionucléides mobiles, comme l' $^{129}\text{I}$ , commencent à apparaître dans les horizons perméables de l'Oxfordien carbonaté correspond également à la période au bout de laquelle les influences de l'évolution géomorphologique commencent à se faire sentir sur les trajectoires des écoulements dans cette même couche carbonatée. Dès leur apparition dans l'Oxfordien carbonaté, le transfert de ces radionucléides est donc influencé par les modifications des directions d'écoulement et par l'apparition d'exutoires locaux.

#### **6.4.7 Les éléments phénoménologiques importants pour la réversibilité**

L'évaluation de la réversibilité est menée par rapport aux conditions hydrauliques et hydriques. On rappellera dans un premier temps les principaux résultats vis-à-vis de la réversibilité, puis on traitera l'analyse des conséquences potentielles d'une exploitation pluriséculaire.

##### **6.4.7.1 L'état du stockage à l'issue de la période séculaire conventionnelle de référence d'exploitation du stockage**

À l'issue de la période séculaire d'exploitation (au moment de la fermeture), la corrosion des composants métalliques, et de manière générale les processus chimiques, sont limités. C'est le cas au sein des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés : elles sont proches de la saturation totale, mais les vitesses de corrosion sont faibles (quelques micromètres par an au maximum) de sorte que les épaisseurs de corrosion sont de quelques millimètres. Ainsi, plus particulièrement, la faible corrosion des chemisages pendant cette période conduit au maintien de leur résistance mécanique et donc à leur étanchéité de sorte que les colis sont dans un environnement « sec » et ne sont pas affectés par une corrosion significative. Pour les alvéoles de déchets B et les galeries, la limitation des processus chimiques (dégradation des bétons et corrosion des composants métalliques) et corrélativement celle des processus mécaniques (fluage des argilites) est liée à l'état non saturé de ces ouvrages, soit en raison de leur ventilation, soit parce que le temps nécessaire à leur resaturation totale après fermeture est de plusieurs dizaines de milliers d'années à 200 000 ans. Ainsi, même si les alvéoles de déchets B sont fermées avant la fin de la période séculaire, elles restent dans un état non saturé à l'issue de cette période.

##### **6.4.7.2 L'influence d'une période d'exploitation pluriséculaire sur la réversibilité**

###### **● Pour les galeries**

Le maintien de la ventilation sur une période pluriséculaire n'aurait pas d'influence sur les écoulements et l'état de saturation des infrastructures en béton et des argilites en champ proche. En effet, un état pseudo permanent est déjà établi à partir de la dizaine d'années d'exploitation du stockage. Les flux d'eau drainés et le profil de degré de saturation (dans les argilites) depuis la paroi

de ces ouvrages évoluent ensuite très lentement : au bout de quelques centaines d'années supplémentaires, le profil de degré de saturation n'aurait progressé que de quelques centimètres. L'absence d'évolution significative de l'état de saturation de ces ouvrages contribue par ailleurs à la limitation des processus de dégradation chimique (dégradation des bétons notamment), ainsi qu'à leur tenue mécanique.

- **Pour les alvéoles de déchets B**

Des conclusions similaires à celles des galeries peuvent être apportées si ces alvéoles étaient maintenues ouvertes et ventilées sur une période pluriséculaire. Plus spécifiquement, une interaction entre les décharges hydrauliques de deux alvéoles de stockage voisines se ferait sentir après quelques dizaines d'années de ventilation mais cette influence resterait limitée à quelques dixièmes de MPa au maximum à la fin de la période pluriséculaire et n'aurait pas d'effet significatif sur la désaturation des alvéoles et leur état de saturation. Par ailleurs, on notera que le maintien d'une ventilation sur une période pluriséculaire conduirait à l'évacuation de l'hydrogène de corrosion produit.

Si les alvéoles de stockage étaient fermées comme dans le chronogramme d'exploitation conventionnel de référence, mais que le stockage restait ouvert sur une durée pluriséculaire, l'état hydraulique des alvéoles évoluerait peu durant cette période pluriséculaire. En revanche, la quantité d'hydrogène présente à l'intérieur de certaines alvéoles représenterait près des  $\frac{3}{4}$  de l'hydrogène produit au cours de 500 premières années.

- **Pour les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés**

La prolongation de l'exploitation du stockage sur une durée pluriséculaire ne conduirait pas à modifier de façon significative l'évolution des différents processus se déroulant au cours de cette période. En particulier, les vitesses de corrosion resteraient faibles et n'auraient pas de conséquence sur la tenue mécanique des composants métalliques (soutènement et chemisage). L'étanchéité du chemisage serait maintenue, et avec elle l'absence de corrosion des colis de stockage, donc la préservation de leur intégrité physique.

La zone désaturée des argilites autour des galeries d'accès au droit des alvéoles se propagerait au-delà des bouchons des alvéoles, donc dans le premier mètre de la partie utile des alvéoles (celle contenant les colis). L'essentiel de la partie utile resterait donc saturée et avec des conditions anoxiques. La quantité d'hydrogène produite sur une période pluriséculaire est encore limitée (quelques pourcents de la production sur la première phase de 5 000 ans). La pression d'hydrogène a néanmoins commencé à augmenter au-delà de 100 ans, pour atteindre quelques dixièmes de MPa à la fin de la période pluriséculaire.

- **Pour le Callovo-Oxfordien et les encaissants sus-jacents**

À la fin de la période pluriséculaire, la décharge atteindrait le toit et le mur, mais la valeur de la décharge à ces bornes du Callovo-Oxfordien resterait inférieure au dixième de MPa. Autour des puits, les décharges hydrauliques se superposeraient, mais l'augmentation de la dépression totale serait au maximum de quelques dixièmes de MPa.

Ainsi, l'histoire du stockage présentée dans cette section demeure valable pour une période de réversibilité pluriséculaire.

# 7

## Les phénomènes chimiques

---

<b>7.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>269</b>
<b>7.2</b>	<b>L'évolution chimique des ouvrages ventilés pendant l'exploitation du stockage : alvéoles de déchets B, galeries et puits .....</b>	<b>272</b>
<b>7.3</b>	<b>L'évolution chimique des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés .....</b>	<b>283</b>
<b>7.4</b>	<b>L'évolution chimique des alvéoles de déchets B en postfermeture.....</b>	<b>309</b>
<b>7.5</b>	<b>L'évolution chimique des scellements de galerie et de puits en postfermeture .....</b>	<b>326</b>
<b>7.6</b>	<b>L'évolution chimique des scellements de galerie et de puits en postfermeture .....</b>	<b>328</b>
<b>7.7</b>	<b>L'évolution chimique des argilites du Callovo-Oxfordien en champ lointain .....</b>	<b>330</b>
<b>7.8</b>	<b>L'évolution chimique des formations encaissantes (Dogger et Oxfordien carbonaté).....</b>	<b>330</b>
<b>7.9</b>	<b>Synthèse sur l'évolution chimique du stockage et de son environnement géologique .....</b>	<b>331</b>



## 7.1 Introduction

L'évolution chimique intervient à plusieurs titres dans l'évolution phénoménologique globale du stockage et de son environnement géologique :

- associée aux évolutions hydraulique et thermique, elle est l'origine principale du relâchement des radionucléides à travers la dégradation des colis de déchets, comme par exemple la dissolution de la matrice vitreuse des déchets C ou la corrosion des conteneurages métalliques des déchets C ou des combustibles usés. Puis, elle détermine la mobilité des radionucléides relâchés, à travers leur solubilité et leur rétention ;
- elle est un moteur de l'évolution mécanique à travers la dégradation des propriétés mécaniques des composants du stockage couplée avec la dégradation chimique. C'est, par exemple, le cas de l'attaque chimique des bétons des ouvrages d'infrastructure par les eaux des argilites ou de la corrosion des chemisages et revêtements métalliques des alvéoles de stockage des colis de déchets C et des colis de combustibles usés. À ce titre, l'évolution chimique est également une donnée importante pour l'exploitation et pour l'observation du stockage dans le cadre de la réversibilité.

### 7.1.1 Le résultat de déséquilibres

L'évolution chimique résulte principalement de la mise en interface de matériaux, de composants chimiques ou de fluides chimiquement différents. Elle est également influencée tant sur le plan cinétique qu'au niveau de l'initiation des réactions par les phénomènes de nature thermique et hydraulique. Plus particulièrement, sur le plan hydraulique, l'eau est nécessaire au développement des réactions chimiques. D'autre part, les extensions spatiale et temporelle de ces réactions dépendent pour l'essentiel (cas des systèmes à l'équilibre thermodynamique) des flux d'eau mis en jeu et des échanges de solutés participant à ces réactions (*i.e.* conditions de transport des espèces en solution).

Avant la réalisation du stockage, le milieu géologique et, plus particulièrement, la couche du Callovo-Oxfordien sont dans un état d'équilibre chimique. La réalisation du stockage se traduit par la mise en place au sein de la couche du Callovo-Oxfordien de matériaux différents, qui constituent les divers composants du stockage ; ils sont mis en place en interface avec les argilites et/ou entre eux. Il s'agit pour l'essentiel :

- de métaux, par exemple les (sur)conteneurs des déchets C et des combustibles usés ou les déchets B métalliques (coques et embouts, déchets technologiques métalliques...),
- de béton, par exemple pour les infrastructures (soutènement...) ou les colis de stockage des déchets B,
- d'argiles remaniées, par exemple l'argile gonflante pour les scellements et les bouchons des alvéoles de stockage ou les argilites excavées pour les remblais des galeries,
- auxquels il faut ajouter des matériaux spécifiques composant les colis de déchets, par exemple la matrice vitreuse des déchets C, les pastilles d'oxydes d'uranium-plutonium des combustibles usés ou les bitumes des colis de boues bitumées.

Les processus chimiques sont influencés en particulier par :

- le transitoire d'élévation de température produit par les colis de déchets exothermiques, qui affecte principalement le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien (cf. § 5),
- le transitoire hydraulique créé par le stockage (cf. § 6). L'un des faits marquants de ce transitoire est l'existence d'une période d'état non saturé de tout ou partie du stockage, en particulier dans les ouvrages ventilés pendant l'exploitation du stockage (alvéoles de déchets B et galeries). La présence et le renouvellement de l'oxygène sont susceptibles d'initier des processus

(oxydation...), qui n'apparaîtront pas dans les ouvrages non ventilés (alvéoles de déchets C et alvéoles de combustibles usés).

### **7.1.2 Une évolution concernant principalement le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche**

Les processus chimiques mis en jeu sont surtout des processus d'interface et ils concernent donc essentiellement le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien. En effet, les formations encaissantes sont suffisamment éloignées du stockage pour ne pas être affectées chimiquement par le stockage. Leur évolution physico-chimique est principalement gouvernée par les changements climatiques et la géodynamique interne (cf. § 9).

### **7.1.3 L'indépendance et la similitude des évolutions chimiques**

Comme déjà souligné lors de la description des évolutions thermique et hydraulique (cf. § 5 et 6), la conception compartimentée du stockage en zones de stockage distinctes par grands types de déchets HAVL et en modules au sein d'une même zone concourt à des évolutions chimiques (i) indépendantes pour chaque zone et (ii) similaires pour les modules et les alvéoles de stockage d'une même zone.

### **7.1.4 Deux catégories d'ouvrages en terme d'évolution chimique**

Pendant l'exploitation du stockage, la ventilation constitue le moteur principal des processus chimiques et permet de distinguer les alvéoles de déchets B, les galeries et les puits (ventilés au cours de l'exploitation) des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés qui sont rapidement isolées de l'air de ventilation par un capot d'étanchéité.

En phase de postfermeture et d'absence d'oxygène dans le système chimique, ce sont la nature des matériaux introduits dans le stockage et les évolutions thermique et hydraulique décrites dans les chapitres 5 et 6 qui permettent de distinguer deux grandes catégories d'ouvrages vis-à-vis de l'évolution chimique :

- l'une caractérisée par la présence de métaux et/ou d'argile gonflante (les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés, les scellements de galeries et de puits),
- l'autre dont le constituant majoritaire est cimentaire (les alvéoles de déchets B, les galeries, les puits),

Les premiers ouvrages peuvent présenter une forte thermicité (alvéoles de déchets C et alvéoles de combustibles usés) et sont caractérisés par l'atteinte d'un état saturé en moins d'un millier d'années. La seconde catégorie possède une thermicité faible (cf. § 5) et conserve un état désaturé pendant au moins plusieurs dizaines de milliers d'années.

### 7.1.5 L'organisation du chapitre

Sur la base des considérations évoquées ci-dessus, la description de l'évolution chimique du stockage et de son environnement géologique est structurée en fonction d'une part, de la gestion du stockage (exploitation, postfermeture) et d'autre part, de la catégorie des ouvrages. On s'intéresse principalement au stockage et à la couche du Callovo-Oxfordien. Les formations encaissantes sont traitées en fin de chapitre (cf. § 7.8). Ce chapitre est organisé en 7 parties.

1. L'évolution chimique des ouvrages ventilés en phase d'exploitation : alvéoles de déchets B, galeries et puits.

Dans cette partie, les problématiques abordées sont l'oxydation des argilites, la carbonatation atmosphérique des bétons, la corrosion atmosphérique ou en milieu poreux non saturé des aciers et la radiolyse des composants organiques de déchets B.

2. L'évolution chimique des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés en exploitation et en phase de postfermeture. En effet, pour ces ouvrages, la pose d'un capot d'étanchéité en phase d'exploitation permet de considérer une évolution chimique continue sur ces deux périodes.

Les principaux processus chimiques mis en jeu sont, pour la partie utile des alvéoles, la corrosion des revêtements, des chemisages et des (sur)conteneurs en conditions anaérobies, les interactions de l'argile gonflante de la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés et des argilites en champ proche des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés avec le fer et la dissolution de la matrice vitreuse et des assemblages de combustibles usés. En tête des alvéoles, le principal processus chimique est la perturbation alcaline des bouchons en argile gonflante et des argilites en champ proche au contact des eaux cimentaires issues des bouchons en béton.

3. L'évolution chimique des alvéoles de déchets B en phase de postfermeture.

Cette évolution se déroule essentiellement en conditions anaérobies. Les principaux processus mis en jeu sont la dégradation des matériaux cimentaires par les eaux des argilites du Callovo-Oxfordien, une perturbation alcaline au niveau des argilites et des remblais due aux eaux des bétons, la corrosion des déchets B métalliques (zircaloy des coques, aciers des embouts et des déchets technologiques...) et la dégradation des boues bitumées.

4. L'évolution des scellements de galerie et de puits en phase de postfermeture.

5. L'évolution des galeries pendant la phase de postfermeture.

Les scellements et les galeries sont essentiellement soumis aux phénomènes chimiques liés à la dégradation des composants cimentaires et à la perturbation alcaline dans les matériaux argileux (argile gonflante et argilites) situés au contact du béton.

6. L'évolution chimique du Callovo-Oxfordien en champ lointain.

7. L'évolution chimique des formations encaissantes.

## **7.2 L'évolution chimique des ouvrages ventilés pendant l'exploitation du stockage : alvéoles de déchets B, galeries et puits**

La réalisation du stockage entraîne une arrivée d'air au sein du stockage. La ventilation assure un renouvellement permanent de l'air dans les puits, les galeries et les alvéoles de déchets B jusqu'à leur fermeture. Comme indiqué dans le chapitre 6, l'hygrométrie de l'air de ventilation s'établit dans les galeries et dans les alvéoles de déchets B à une valeur de l'ordre de 50 %, entraînant un état de désaturation importante des bétons de structure et des colis de déchets. La désaturation affecte également les argilites en pourtour des ouvrages. Seuls les puits d'entrée d'air et les premières centaines de mètres de galeries en aval de ces puits présentent une humidité relative de l'air plus élevée.

Les conditions de ventilation entraînent, au niveau des différents composants du stockage, des évolutions chimiques spécifiques de leurs matériaux constitutifs. Les argilites en parois des ouvrages ventilés subissent une oxydation par l'oxygène de l'air. Par ailleurs, les ouvrages en béton réagissent avec le dioxyde de carbone de l'air de ventilation et subissent une carbonatation superficielle. Les matériaux métalliques sont soumis à des processus de corrosion dont l'intensité dépend des conditions de saturation du stockage. En outre, la mise en place des matériaux cimentaires frais entraîne une légère perturbation alcaline au niveau des argilites en parois.

Les conditions fortement désaturées des alvéoles de déchets B durant la période d'exploitation limitent fortement l'évolution chimique des colis de déchets. La quasi-absence d'eau libre limite ou interdit les processus de corrosion ou de dissolution. Cependant, les déchets restent soumis aux processus d'irradiation, tels que l'oxydation radiolytique des boues bitumées. Ces processus sont traités dans une dernière partie (cf. § 7.2.5).

### **7.2.1 La perturbation oxydante dans les argilites en parois des ouvrages du fait de la désaturation**

Pendant la période d'exploitation, l'air de ventilation pénètre progressivement dans les argilites en champ proche des ouvrages ventilés au fur et à mesure de leur désaturation, à savoir au maximum dans la zone microfissurée de l'EDZ (« Excavation Damaged Zone », Encadré 8.1), notamment pour les galeries de liaison qui restent ouvertes durant toute l'exploitation du stockage (cf. § 6).

Les argilites du Callovo-Oxfordien sont initialement à l'équilibre chimique dans des conditions réductrices. Ces dernières sont imposées par le couple sulfures / sulfates, les teneurs en sulfures en solution étant déterminées par la solubilité de la pyrite et celles en sulfates par la solubilité de la célestine (cf. § 3.3.1.8) (Altmann & Jacquot, 2005 ; Andra, 2005h ; Andra, 2005k). La pénétration de l'oxygène de l'air perturbe cet équilibre et entraîne l'oxydation de la pyrite et de la matière organique (Andra, 2005k). L'extension des transformations oxydantes des argilites dans le temps et dans l'espace repose entièrement sur la pénétration de l'oxygène dans les argilites et non pas sur la cinétique intrinsèque de chacune des transformations impliquées. Les processus d'oxydation des argilites sont instantanés sur les échelles de temps de ventilation considérées. Par ailleurs, l'oxydation de la pyrite nécessite à la fois la présence d'oxygène et d'eau (Encadré 7.1). Elle s'effectue donc essentiellement au niveau du front de désaturation qui progresse dans l'EDZ, alors qu'elle est plus lente et limitée dans la zone déjà désaturée. À l'inverse, l'oxydation de la matière organique se développe préférentiellement dans les zones désaturées. L'extension de l'oxydation correspond au plus à l'extension de la zone désaturée soit 2 à 3 mètres sur une période d'exploitation séculaire. Elle se limite donc à l'EDZ et, dans sa masse, elle concerne principalement le voisinage des fractures et des microfissures (Charpentier, 2001 ; Mäder & Mazurek, 1998) (cf. § 8).

Dans les ouvrages d'accès, seules les parois des puits au niveau des argilites du Callovo-Oxfordien et des marnes du Kimméridgien sont susceptibles, de par leur minéralogie, de subir des processus

d'oxydation. L'hygrométrie dans les puits est plus importante que dans les autres ouvrages du stockage (~ 90 %) (Wendling, 2005). Cependant, elle n'est pas suffisante pour empêcher la pénétration de l'oxygène sur la partie fortement désaturée de l'EDZ (zone fracturée essentiellement) (cf. § 6). Ainsi, la perturbation oxydante dans les ouvrages d'accès s'étend principalement sur cette partie de l'EDZ.

#### 7.2.1.1 L'oxydation de la pyrite

L'oxydation de la pyrite, dont la teneur dans les argilites du Callovo-Oxfordien est comprise entre 2 et 3 % (Tableau 3.3.1), par l'oxygène de l'air de ventilation, se traduit *in fine* par la formation de sulfates et d'ions ferreux (Encadré 7.1). Elle conduit également à une libération de protons entraînant localement une chute de pH des fluides interstitiels. Cependant, l'effet tampon, exercé sur le pH des fluides interstitiels par la dissolution de la calcite présente dans les argilites (Andra, 2005k), est de nature à empêcher les fluides interstitiels des argilites en cours d'oxydation d'atteindre des valeurs de pH acides (< 7).

L'oxydation est probablement catalysée et accélérée par le développement d'une activité bactérienne introduite dans le stockage du fait de l'activité humaine (Andra, 2005k). Les bactéries qui catalysent l'oxydation de la pyrite sont acidophiles. Néanmoins, l'effet tampon de la calcite limite le développement effectif de populations bactériennes. Par conséquent, leur effet catalytique sur la cinétique d'oxydation de la pyrite des argilites reste limité.

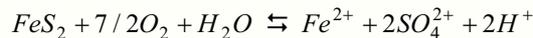
La perturbation oxydante entraîne une modification de la composition des eaux de pores avec un enrichissement en calcium et en sulfates. Des échanges cationiques Na / Ca avec les minéraux argileux se produisent, les phases smectitiques sodiques devenant calciques. Par ailleurs, des phases secondaires précipitent lors de la progression de la désaturation du milieu : gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), jarosite ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), oxydes et hydroxydes de fer tels qu'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) et goëthite ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ).

**Encadré 7.1 L'oxydation de la pyrite (FeS<sub>2</sub>)**

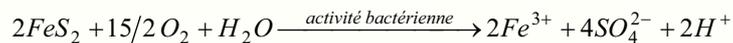
La pyrite est une cause d'acidification des rivières. À ce titre, son oxydation a été largement étudiée de sorte que ce processus est aujourd'hui bien appréhendé dans sa globalité (Andra, 2005f, Tome 3 ; Rimstidt & Vaughan, 2003).

**Le processus d'oxydation**

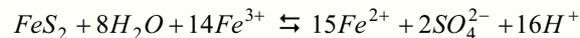
L'oxydation de la pyrite nécessite la présence à la fois d'oxygène et d'eau. Elle se décompose en de nombreuses étapes élémentaires qui se traduisent par la réaction bilan suivante (Rimstidt & Vaughan, 2003) :



Le degré d'oxydation du fer reste bloqué au degré +II, l'oxydation par l'oxygène au degré +III étant thermodynamiquement possible mais cinétiquement lente (Andra, 2005f, Tome 3 ; Andra, 2005k ; Crusset, 2005 ; Gras, 2001), sauf lorsque la réaction est catalysée par la présence de la bactérie *Thiobacillus Ferrooxidans*. Le bilan de l'oxydation de la pyrite s'écrit alors (Panin *et al.*, 1985) :



Le fer ferrique ainsi produit constitue lui-même un oxydant puissant qui accélère l'oxydation de la pyrite. La mise en place du cycle « oxydation de la pyrite → formation d'ions ferreux → formation d'ions ferriques → oxydation de la pyrite », amplifie progressivement les réactions chimiques existantes et accélère le processus d'oxydation de la pyrite :



Les bactéries, en régénérant le fer ferreux produit lors de la réaction précédente sous sa forme ferrique, amplifient progressivement les réactions chimiques existantes et accélèrent le processus d'oxydation de la pyrite.

En l'absence d'activité bactérienne, le Fe<sup>II</sup> libéré par l'oxydation chimique de la pyrite est incorporé dans des solutions solides de carbonates (ankérite CaFe(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) ou dans la structure des minéraux argileux en sites octaédriques.

Le Fe<sup>III</sup> précipite sous forme d'oxyde (hématite Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ou d'oxyhydroxyde (gauthite FeO(OH)) (Charpentier, 2001 ; Pokrovski *et al.*, 2003).

**L'extension de l'oxydation de la pyrite dans les argilites autour des ouvrages du stockage**

L'extension spatiale du processus d'oxydation de la pyrite est déterminée par la pénétration de l'oxygène dans les argilites autour du stockage. Ceci concerne donc principalement les ouvrages ventilés autour desquels une désaturation des argilites se produit. Cette désaturation permet une entrée d'oxygène significative et l'extension de l'oxydation est déterminée par celle de la désaturation. Dans les argilites saturées, la diffusion ou le transport convectif de l'oxygène dissous est trop lent pour permettre une entrée significative de l'oxygène et l'oxydation reste un phénomène de peau.

### 7.2.1.2 L'oxydation de la matière organique

L'étude des processus d'oxydation de la matière organique contenue dans les formations géologiques porte principalement sur les charbons et les huiles et moins sur des phases organiques de type kérogène, riches en matière organique immature comme celles contenues dans les argilites du Callovo-Oxfordien. Néanmoins, des séries d'expérimentations ont été menées afin de caractériser ces processus, en particulier en fonction des conditions de température (Andra, 2005a, Situation P\_0 ; Andra, 2005k ; Elie *et al.*, 2000 ; Faure *et al.*, 1999). Ces expériences ont permis de caractériser assez précisément les processus d'oxydation mis en œuvre.

L'oxydation de la matière organique immature contenue dans les argilites du Callovo-Oxfordien conduit à l'incorporation d'oxygène dans la structure du kérogène et à la formation de fonctions oxygénées (acides, cétones...). La progression de l'oxydation de la matière organique peut être suivie au travers de différents phénomènes : la dégradation des marqueurs biologiques de la matière organique (hopanes, hopènes, stéranes, stérènes), le déplacement de la distribution des n-alcanes vers les bas poids moléculaires et la production de composés polaires de bas poids moléculaire avec une forte proportion d'acides carboxyliques. Ces composés, mis en solution avec la resaturation des argilites, ont, pour certains d'entre eux, des propriétés complexantes envers les radionucléides (Andra, 2005k). Néanmoins, compte tenu des quantités potentiellement mobilisables, leur influence sur le transport des radionucléides n'est pas significative.

### 7.2.2 La carbonatation atmosphérique des bétons de structure

La ventilation et l'état désaturé des composants d'infrastructure en béton concourent aux processus de carbonatation atmosphérique, à savoir la réaction du béton avec le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) contenu dans l'air (Encadré 7.2). Néanmoins, dans les alvéoles de déchets B, les galeries et les puits de retour d'air, les conditions de faible hygrométrie (~ 50 %) entraînent une désaturation des matériaux cimentaires, entre 20 % et 30 % de saturation, qui limite fortement la carbonatation atmosphérique par absence d'eau liquide (Andra, 2005f, Tome 2). Ainsi, même pour des durées de ventilation à l'échelle séculaire, la carbonatation n'excède pas l'échelle centimétrique (Bourbon, 2005) et reste diffuse. Les élévations de température dans le stockage pendant cette période, exposées dans le chapitre 5, n'influencent pas ces processus.

Dans les puits d'entrée d'air, les conditions d'humidité relative plus élevées (jusqu'à ~ 90 %) que dans les galeries et les alvéoles de déchets B (cf. § 6) entraînent une saturation plus importante des matériaux cimentaires (degré de saturation entre 40 % et 50 %). Cette saturation des bétons limite le transfert du CO<sub>2</sub> (principalement en phase dissoute) en leur sein de sorte que l'extension de la carbonatation dans ces puits n'excède pas non plus l'échelle centimétrique (Bourbon, 2005).

Dans les premières centaines de mètres des galeries, l'hygrométrie varie entre 90 % et 50 %. C'est dans cette fourchette que se situe le domaine d'humidité relative optimale pour le développement de la carbonatation (55 % à 65 %) (Andra, 2005f, Tome 2), (Encadré 7.2) son extension est alors d'ordre décimétrique au maximum pendant la durée de l'exploitation des ouvrages.

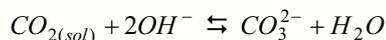
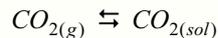
### Encadré 7.2 *La carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires (1/2)*

Du fait de leur minéralogie (Encadré 2.8), les matériaux cimentaires sont très réactifs en présence de CO<sub>2</sub> gazeux ou d'eaux riches en carbonates. La réaction avec le CO<sub>2</sub> gazeux, nommée carbonatation atmosphérique, est bien connue dans le domaine du génie civil de par ses conséquences sur la corrosion des ferraillements et, *in fine*, sur le comportement mécanique du béton armé. Elle a fait l'objet de nombreuses études dont les résultats ont notamment contribué aux spécifications de formulation des bétons et à la définition des règles de ferraillement. Les connaissances acquises, confortées par le suivi de l'évolution de la carbonatation atmosphérique sur des ouvrages pendant des durées d'ordre pluridécennales, donnent une confiance dans les modèles développés et dans leur application à l'évaluation de la carbonatation atmosphérique dans le cadre du stockage pendant la période d'exploitation sur la durée séculaire conventionnelle de référence et sur une durée plus longue d'ordre pluriséculaire (Andra, 2005f, Tome 2).

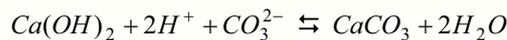
#### **Les réactions chimiques mises en jeu**

La carbonatation atmosphérique peut être décomposée selon les trois étapes suivantes (Andra, 2005f, Tome 2 ; Bourbon, 2005). Les étapes 2 et 3 sont identiques pour la carbonatation sous eau :

1. le transfert en phase gazeuse du CO<sub>2</sub> atmosphérique au sein du matériau *via* la porosité connectée non saturée ;
2. la dissolution du CO<sub>2</sub> dans la phase aqueuse interstitielle :



3. la neutralisation des hydrates du ciment (portlandite Ca(OH)<sub>2</sub> ; silicates de calcium hydratés CSH) par CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> et leur dissolution progressive, en même temps que la précipitation de carbonate de calcium (Andra, 2005f, Tome 2) :

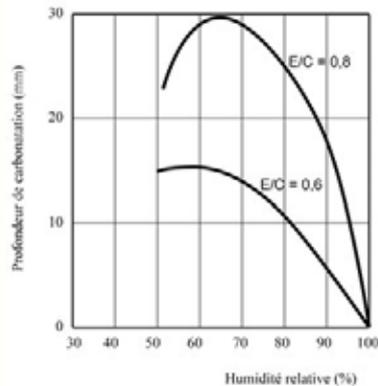


Cette réaction conduit à une diminution progressive du pH des eaux interstitielles du fait de la disparition de la portlandite et des CSH. Cette diminution du pH est responsable de la dépassivation des armatures entraînant une augmentation de la cinétique de corrosion, la formation de produits de corrosion expansifs et, *in fine*, une fissuration, voire une fracturation du béton.

#### **L'extension temps-espace de la carbonatation**

L'extension spatiale de la carbonatation atmosphérique est déterminée par le transfert du CO<sub>2</sub> dans le béton. Elle dépend donc en particulier du degré de saturation en eau du béton. Proche de la saturation totale, l'extension de la carbonatation est contrainte par le transport du CO<sub>2</sub> en phase dissoute dans l'eau. À l'état très désaturé, le CO<sub>2</sub> gazeux peut migrer rapidement, mais c'est alors la quantité d'eau disponible qui limite la carbonatation. On observe ainsi généralement un maximum de propagation de la carbonatation en fonction du degré de saturation en eau (*i.e.* humidité relative) comme illustré sur la figure ci-après.

### La carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires (2/2)



*Influence de l'humidité relative sur l'extension de la carbonatation d'un béton en fonction de la composition initiale de ce dernier (E / C : rapport initial eau / ciment de gâchage) (Andra, 2005f, Tome 2)*

La carbonatation atmosphérique se propage par front à l'intérieur des matériaux cimentaires. Les réactions de carbonatation entraînent, au droit du front de réaction, d'une part une diminution de la porosité (colmatage) par la précipitation de calcite et d'autre part une augmentation *de facto* du degré de saturation (formation d'eau par la carbonatation et diminution de la porosité). La conjugaison de ces deux phénomènes conduit à un fort ralentissement de la cinétique de propagation de la carbonatation par la limitation du transfert du CO<sub>2</sub> au sein des matériaux cimentaires.

## 7.2.3 La corrosion des composants métalliques de structure

### 7.2.3.1 Les viroles des puits

Dans les puits d'entrée d'air, l'air de ventilation ayant une forte hygrométrie (~ 90 %) proche de la saturation, les processus de corrosion des matériaux métalliques inclus dans les matériaux cimentaires sont importants. Cependant, pendant la période d'exploitation, le suivi des ouvrages permet le remplacement des composants corrodés.

Le cas de la virole placée à la verticale des Calcaires du Barrois est particulier du fait de leur contact par leur face externe avec un béton saturé en interaction chimique avec les eaux des Calcaires du Barrois et en face interne avec un béton non totalement saturé en interaction chimique avec l'air ventilé du puits. Elle est ainsi soumise sur ses deux faces à une corrosion généralisée en milieu cimentaire sain oxydant, saturé en face externe et partiellement saturé en face interne (degré de saturation compris entre 40 % et 50 %). En face externe, dans les conditions des eaux des Calcaires du Barrois chargées en chlorures (Andra, 2003c), la vitesse de corrosion généralisée est de l'ordre de la dizaine de micromètres par an du fait de la présence simultanée de O<sub>2</sub> et Cl<sup>-</sup> (Andra, 2005f, Tome 3). La progression de la dégradation des matériaux cimentaires par les eaux des Calcaires du Barrois entraîne une diminution du pH des eaux interstitielles (cf. § 7.4.2) et conduit à une augmentation des cinétiques de corrosion (Encadré 7.3) jusqu'à la centaine de micromètres par an. Au niveau de la face interne, la corrosion est limitée par le flux d'oxygène au travers du béton partiellement saturé, sa vitesse devrait être de l'ordre du micromètre par an, en raison de l'état non totalement saturé du béton et de l'absence de chlorures (Andra, 2005f, Tome 3).

La corrosion de la virole est donc d'ordre centimétrique sur la durée séculaire d'exploitation du stockage. Elle n'affecte pas l'épaisseur totale (pluricentimétrique) de la virole et ses conséquences sur son comportement mécanique sont limitées.

### **7.2.3.2 Les autres composants métalliques**

Les très faibles quantités d'eau disponibles pendant la période de ventilation (humidité relative de l'ordre de 50 %) inhibent quasi complètement les processus de corrosion susceptibles d'affecter les autres composants métalliques enrobés dans des matériaux cimentaires (cintres au niveau des scellements, fibres métalliques des conteneurs de colis de stockage de déchets B,...). Ainsi, en raison de l'état faiblement saturé des bétons (degré de saturation de 20 à 30 %, cf. § 6.3), leur corrosion est très faible durant la période séculaire d'exploitation.

*Encadré 7.3      La corrosion des aciers non ou faiblement alliés (1/3) (Andra, 2005f, Tome 3)*

**Introduction**

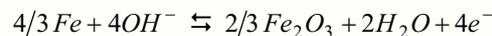
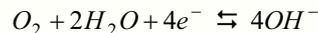
Les connaissances sur la corrosion des aciers sur des durées d'ordre millénaire à plurimillénaire ont été développées dans le cadre de nombreux projets européens relatifs à l'étude d'un stockage géologique (CONTAINER CORROSION, COBECOMA,...). Les mécanismes et les vitesses de corrosion ont été étudiés grâce à de nombreuses expérimentations et modélisations. Elles mettent en évidence le rôle des couches protectrices de corrosion.

L'extrapolation du processus de corrosion à la fois dans le temps et dans l'espace s'appuie par ailleurs sur l'étude de nombreux analogues archéologiques (David, 2003), qui, bien que souvent représentatifs de conditions différentes de celles d'un stockage (conditions oxydantes essentiellement), confirment le rôle des couches protectrices.

D'une manière générale, on peut distinguer deux conditions d'environnement vis-à-vis de la corrosion : (i) en milieu de type atmosphérique et (ii) en milieu aqueux au contact ou non d'un milieu poreux saturé ou partiellement saturé. Les cinétiques et parfois les produits de corrosion formés varient en fonction de ces différentes conditions. Pour ces diverses conditions, la corrosion dépend de la présence ou non d'oxygène.

**La corrosion en présence d'oxygène**

La corrosion en conditions atmosphériques est semblable à celle en phase aqueuse puisqu'elle se produit dans le film d'eau liquide à la surface des aciers. Dans l'eau aérée, la corrosion est pilotée par la réaction cathodique de réduction de l'oxygène dissous et correspond aux domaines de stabilité des oxydes et oxyhydroxydes de Fe<sup>III</sup> (ferrihydrite Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.0,5H<sub>2</sub>O, lepidocrocite γ-FeOOH, goëthite α-FeOOH, hématite α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,...) (Andra, 2005f, Tomes 1 et 3). Par exemple :



Pour les composés solides du fer<sup>III</sup>, la stabilité de la goëthite est limitée à des températures inférieures à 100 °C alors que celle de l'hématite est favorisée par l'élévation de la température.

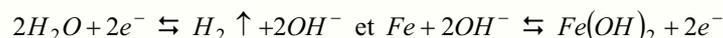
Au contact de matériaux argileux, la présence de phyllosilicates et de montmorillonite retarde ou bloque la transformation de ferrihydrite en hématite cristallisée et en goëthite. Le Fe<sup>III</sup> reste présent sous forme d'oxyhydroxydes.

La présence d'espèces solubles (carbonates, sulfures,...) peut entraîner la formation d'autres composés : sidérite (FeCO<sub>3</sub>), ferrosilite (FeSiO<sub>3</sub>), pyrite (FeS<sub>2</sub>), vivianite (Fe<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.8H<sub>2</sub>O),..., (Andra, 2005f, Tome 3).

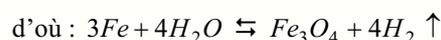
**La corrosion en conditions anoxiques**

En l'absence d'oxygène ou d'autres espèces oxydantes, la seule réaction cathodique possible du système fer-eau est la réduction de l'eau avec formation d'hydrogène (Andra, 2005f, Tome 3). Dans ces conditions, le fer métal s'oxyde en formant de la magnétite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). Cette réaction résulte de deux processus simultanés :

- l'oxydation du fer couplé avec la réduction de l'eau :



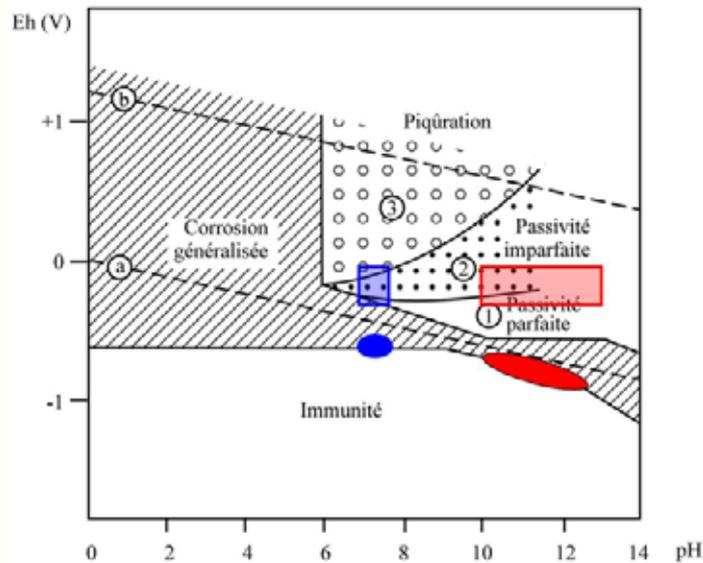
- Puis la formation de magnétite à partir de l'hydroxyde ferreux (réaction de Schikorr) :



**La corrosion des aciers non ou faiblement alliés (2/3)**

**La thermodynamique et les cinétiques de corrosion**

La thermodynamique et la cinétique de la corrosion du fer en présence d'oxygène ou en conditions anoxiques sont influencées par un certain nombre de paramètres et, en particulier, la saturation, le milieu au contact, le pH et la présence de chlorures. Les conditions Eh/pH du milieu au contact du fer imposent des conditions de corrosion variables : corrosion généralisée, piqûration, passivation, immunité (cf. Figure ci-dessous) (Andra, 2005f, Tome 3 ; Pourbaix, 1972).



Comportement du fer dans l'eau en présence d'ions chlorures (355 ppm Cl<sup>-</sup>) : circonstances expérimentales d'immunité, de corrosion généralisée, de passivité parfaite ⊙ et imparfaite ⊚ et de piqûration ⊛

**Rectangle bleu** : domaine de stabilité des eaux des argilites du Callovo-Oxfordien ; **Rectangle rouge** : domaine de stabilité des eaux des bétons ; **Ovale bleu et rouge** : potentiels du métal ; a) ligne correspondant à la réaction de dégagement de H<sub>2</sub>, b) ligne correspondant à la réaction de dégagement de O<sub>2</sub>. L'eau est stable entre les lignes a) et b). NB : en l'absence d'oxygène, le métal peut prendre un potentiel inférieur à celui déterminé par la ligne de réduction de l'eau. L'eau est alors l'oxydant, qui se réduit en formant de l'hydrogène.

Les cinétiques moyennes de corrosion évoluent ainsi en fonction des conditions du milieu environnant (cf. Figure et Tableau ci-dessous) (Andra, 2005f, Tome 3 ; Gras, 2001). Les valeurs sont globalement valables pour des températures de l'ordre de 25 – 50 °C pour les milieux cimentaires et 25 – 80 °C pour les milieux argileux. Quelques valeurs sont données à titre indicatif dans le tableau ci-dessous.

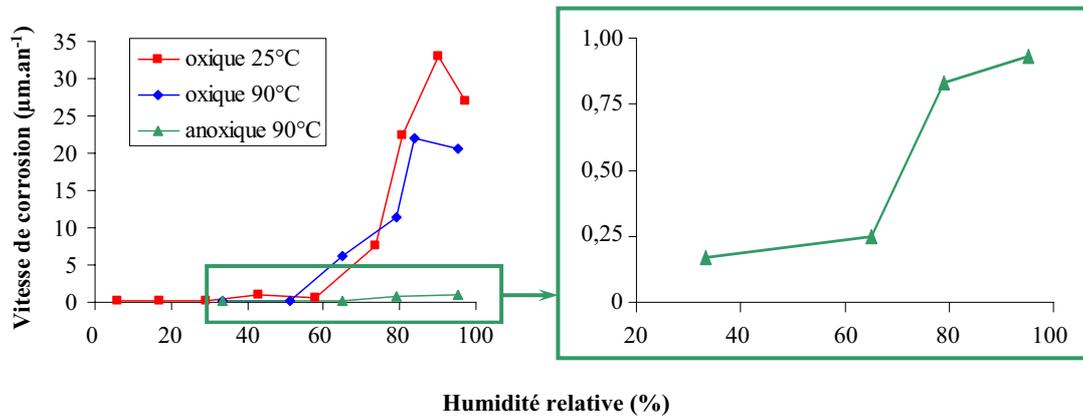
Ordre de grandeur des vitesses moyennes de la corrosion des aciers noirs ou faiblement alliés dans différentes conditions à moyen terme (quelques années)

	Milieu cimentaire	Milieu argileux
En présence d'oxygène	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ≤ 1 μm.an<sup>-1</sup> avec passivation</li> <li>• &gt; quelques μm.an<sup>-1</sup> à quelques 10 μm.an<sup>-1</sup> avec dépassivation</li> </ul>	quelques 10 μm.an <sup>-1</sup>
En absence d'oxygène	≤ 1 μm.an <sup>-1</sup>	quelques μm.an <sup>-1</sup> au maximum

De nombreux facteurs influencent ces vitesses, en particulier le pH, la teneur en oxygène dissous, la formation des produits de corrosion, la saturation en eau du milieu,... En absence d'oxygène et en milieu argileux, elle est considérée en référence égale à 2-5 μm.an<sup>-1</sup>. Néanmoins, des expérimentations suggèrent fortement que ces vitesses pourraient être beaucoup plus faibles (de l'ordre du μm.an<sup>-1</sup>, voir moins).

### La corrosion des aciers non ou faiblement alliés (3/3)

Un exemple de l'influence de la saturation des milieux est donné sur les courbes ci-dessous.



*Influence de l'humidité relative sur la vitesse de corrosion généralisée d'un acier non allié au carbone au contact de l'argile gonflante MX80 (Andra, 2005f, Tome 3)*

#### 7.2.4 La perturbation alcaline des argilites par le béton des composants d'infrastructure

Lors du creusement des différents ouvrages du stockage, la mise en place de béton projeté frais comme soutènement provisoire en parois des argilites conduit à un contact entre les fluides fortement alcalins du béton (pH ~ 13,5) et les argilites, ce qui entraîne le développement d'une perturbation alcaline en surface de ces dernières. La perturbation reste limitée en peau au contact du béton, car la prise du béton (quelques jours à quelques semaines, cf. § 6), puis sa désaturation avec la ventilation conduisent à limiter, voire à empêcher la disponibilité d'eau cimentaire au contact des argilites.

#### 7.2.5 Les processus d'altération des colis de stockage de déchets B

##### 7.2.5.1 La carbonatation atmosphérique des composants en béton des colis de stockage

Comme le soutènement et le revêtement de l'alvéole, les colis de stockage de déchets B sont dans un état fortement désaturé pendant la période de ventilation des alvéoles. L'ensemble des composants en béton des colis de stockage (enveloppe, matrice d'enrobage de certains déchets et enveloppe de certains colis primaires) est soumis à une très faible carbonatation atmosphérique.

##### 7.2.5.2 La dégradation chimique des déchets

Comme indiqué dans le chapitre 2.3.4, le contenu et la structure des colis de stockage de déchets B recouvrent une grande diversité de matériaux, donc de processus de dégradation chimique au sens large. Cependant, la faible disponibilité en eau rend quasi inexistantes ces processus de dégradation, comme la corrosion des composants métalliques tels que les conteneurs de colis primaires en acier inoxydable ou en acier noir, ou les déchets eux-mêmes (colis types B1, B3, B4, B5 et B6).

Les processus de dissolution des boues bitumées (colis types B2) par l'eau sont également quasi nuls car les faibles humidités relatives ( $\leq 50\%$ ) (cf. § 6) ne favorisent pas la condensation de l'eau en surface des enrobés (Andra, 2005d).

En ce qui concerne les autres déchets (par exemple l'alliage AIC, le carbure de bore, les verres (pyrex, verre nucléaire...), les composés organiques, les diverses sources scellées, les sulfates de plomb, les déchets radifères, les gravats, les boues de filtration ou le graphite), ils présentent également des évolutions chimiques quasi nulles par manque d'eau.

### 7.2.5.3 Les effets radiolytiques dans les colis de stockage de déchets B (Andra, 2005d)

Les déchets B sont soumis, pendant la période de ventilation, aux rayonnements dus à la décroissance de leurs radionucléides. Ces rayonnements n'ont pas d'effet sur les déchets métalliques, en revanche ils affectent les déchets contenant des composés organiques : en particulier la matrice bitume des colis types B2 et les composés organiques des colis types B3, B5 et B6 (PVC, polyuréthane, cellulose...).

En peu des colis de boues bitumées, la combinaison de l'oxydation (air de ventilation) et de la radiolyse (radio-oxydation) sous l'effet de l'irradiation issue des sels radioactifs enrobés entraîne la formation de CO, de CO<sub>2</sub> et d'espèces organiques oxygénées ainsi que l'évolution de la viscosité du bitume (Encadré 7.4). Sur une durée séculaire de la phase de ventilation des alvéoles de déchets B, l'oxygène ne diffuse à l'intérieur du bitume que sur une distance d'ordre centimétrique. La radio-oxydation du bitume affecte donc une épaisseur limitée des colis et reste un phénomène de peau.

Le reste de la matrice est soumis à des processus de radiolyse en conditions insaturées et sans oxygène. Cela entraîne principalement la production d'hydrogène par radiolyse de la matrice bitume. D'autres gaz, tels que CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ou C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, sont également produits, mais en petites quantités. L'irradiation du bitume en conditions anoxiques et la perte d'hydrogène conduisent à une augmentation de la condensation du bitume et donc de sa viscosité.

Les sels ne participent pas aux processus de radiolyse, excepté les sels de cobalt utilisés pour les boues bitumées des colis types B2.1 (familles STE2 et STE3) qui consomment une partie de l'hydrogène produit. La production d'hydrogène au sein de la matrice bitume entraîne le gonflement de l'enrobé. Dans un premier temps, l'hydrogène produit est évacué par diffusion. Dans un second temps, lorsque les teneurs en hydrogène dépassent son seuil de solubilité, il se forme une bulle de gaz qui migre hors de l'enrobé.

À titre d'exemple, la production d'hydrogène des colis STE2 est d'environ 1 à 2 l.an<sup>-1</sup>.colis<sup>-1</sup> entre 10 et 100 ans après fabrication, ce qui conduit à atteindre le gonflement maximal de l'enrobé après environ une cinquantaine d'années.

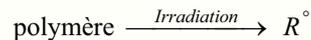
Ainsi, pendant la durée de l'exploitation, la dégradation chimique des boues bitumées ne concerne que la matrice bitume (production de gaz essentiellement).

La radiolyse des plastiques (colis types B5.1, B3.1.3, B3.1.2...) conduit à la formation de gaz comme H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et HCl (Talandier, 2005). La production de HCl par le PVC intervient sur une courte période (~ 8 ans) après la production du colis B5.1 et est donc terminée lors de la prise en charge des colis dans le stockage. La production totale de CO<sub>2</sub> par le polyuréthane est faible, elle n'excède pas 10 moles par colis B5.1 sur l'ensemble de sa période de dégradation. L'évaluation de la production d'hydrogène par les colis B5.1 conduit à une production d'environ 22 l.an<sup>-1</sup>.colis<sup>-1</sup> (soit environ 1 mole de H<sub>2</sub> par an et par colis) pendant la période d'exploitation. Tous ces gaz sont évacués par la ventilation.

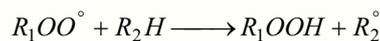
**Encadré 7.4 La radio-oxydation de la matrice bitume des boues bitumées**

D'une façon générale, les mécanismes de dégradation d'une matrice bitume sont semblables à ceux de tout polymère organique. En présence d'oxygène, l'auto-irradiation de la matrice bitume provoque son oxydation (Andra, 2005d). Ce processus se déroule en plusieurs étapes.

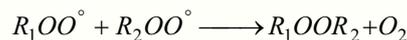
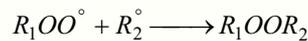
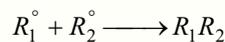
- Tout d'abord, l'irradiation du bitume conduit à des ruptures de liaisons homolytiques et à la formation de radicaux libres ( $R^\circ$ ), dits primaires. Il s'agit de la première étape du processus de vieillissement radiochimique ou amorçage :



- En présence d'oxygène, la radio-oxydation du bitume se poursuit par une réaction en chaîne dans laquelle la propagation fait intervenir l'addition d'oxygène sur un radical ( $R_1^\circ$ ) et l'arrachement d'un atome d'hydrogène au substrat ( $R_2H$ ) conduisant à la formation d'un hydroperoxyde et d'un autre radical :



La cinétique de la réaction dépend de la concentration en radicaux libres et de la teneur en oxygène. Elle est ainsi fonction, pour un matériau donné, du débit de dose, de la pénétration de l'oxygène dans la matrice qui est un processus lent et du mode d'évolution des radicaux peroxydes formés. En effet, ces radicaux entretiennent (propagation) ou limitent (terminaison) la réaction d'oxydation ; la propagation s'arrête lorsque deux radicaux réagissent entre eux pour donner par recombinaison des espèces non réactives :



La radio-oxydation du bitume entraîne la formation de nombreux composés organiques oxydés (acides formique et acétique, composés carbonylés, alcools, composés azotés...), susceptibles d'être consommés par l'activité bactérienne et de migrer dans les alvéoles lors de leur dissolution (Andra, 2005d ; Bourbon, 2005). Ces composés organiques sont ainsi globalement plus solubles que ceux libérés lors d'une irradiation sans oxygène.

### 7.2.6 Éléments de synthèse sur l'évolution chimique des ouvrages ventilés en phase d'exploitation

Cette étape est marquée par un état fortement désaturé de l'ensemble des ouvrages ventilés. Les interactions chimiques sont ainsi limitées par les faibles quantités d'eau disponibles. L'oxydation des argilites en paroi de ces ouvrages est circonscrite à l'EDZ et à la proximité des fractures et microfissures au sein de la zone endommagée. La corrosion des composants métalliques ainsi que la carbonatation atmosphérique des bétons sont des phénomènes d'ampleur réduite qui n'affectent pas les propriétés de ces composants. La radiolyse des composants organiques présents dans différents colis types de déchets B est un phénomène qui conduit à la production de gaz (principalement d'hydrogène) et à l'altération très superficielle par radio-oxydation des boues bitumées. Les gaz produits au cours de

la période d'exploitation sont évacués par la ventilation. Enfin, compte tenu de l'hygrométrie à l'intérieur des alvéoles de déchets B, la radiolyse de l'air de ventilation (eau vapeur et azote) est faible.

### **7.3 L'évolution chimique des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés**

La pose d'un capot d'étanchéité peu après la mise en place des colis dans les alvéoles de déchets C et dans les alvéoles de combustibles usés permet de limiter très largement les échanges avec les galeries d'accès attenantes. Dans ces conditions, on peut considérer que la période d'exploitation de ces ouvrages non ventilés ne diffère que très peu sur le plan de l'évolution chimique de la phase de postfermeture qui débute réellement après la mise en place du bouchon d'alvéole en argile gonflante. L'intervention consistant à déposer le capot d'étanchéité et à mettre en place le bouchon en tête d'alvéole dure quelques jours au maximum. Le transitoire oxydant associé à cette courte opération peut être négligé dans l'évolution chimique de ces alvéoles.

Les alvéoles de colis de déchets C diffèrent de celles accueillant les colis de combustibles usés par l'absence d'une barrière ouvragée à base d'argile gonflante interposée entre les colis et les argilites. Plus précisément, la barrière ouvragée est disposée entre le chemisage et le revêtement métallique des alvéoles de combustibles usés. En revanche, les deux types d'alvéoles présentent des têtes similaires, à savoir un bouchon en argile gonflante et un bouchon en béton.

La conception des alvéoles de stockage en deux parties distinctes et de longueurs différentes conduit à considérer que leur évolution chimique comporte aussi deux composantes distinctes, l'une relative à la partie utile de l'alvéole et l'autre à la tête de l'alvéole. En effet, mis à part les effets chimiques indirects liés au dégagement de chaleur émis par les colis dans la partie utile ou au transfert d'hydrogène, les évolutions chimiques des deux parties d'une alvéole s'influencent peu et peuvent être considérées comme quasi indépendantes.

- Au-delà du comportement chimique propre des assemblages de combustibles usés et des matrices vitreuses, l'évolution chimique de la partie utile est marquée par la présence des composants métalliques (revêtement, chemisage, (sur)conteneur) et des matériaux argileux au sens large (argilites et/ou argile gonflante de la barrière ouvragée). La corrosion, les interactions entre les argiles au sens large et le fer, ainsi que l'équilibrage chimique entre les argilites et les argiles gonflantes sont ainsi les principaux processus chimiques impliqués.
- L'évolution chimique de la tête d'alvéole est principalement marquée par les interactions entre les argiles au sens large (argilites et argile gonflante du bouchon) et le béton : la perturbation alcaline des argiles et la dégradation chimique des bétons.

L'évolution chimique des deux parties de l'alvéole est influencée par les processus hydrauliques et par la charge thermique. Les premiers déterminent un ensemble de paramètres dont dépendent la nature et les extensions spatiale et temporelle des processus chimiques : présence d'eau, flux d'eau, organisation des écoulements, conditions de transport des solutés. La charge thermique intervient comme un paramètre classique des réactions chimiques. On retiendra en particulier que :

- le paroxysme thermique de 90 °C à l'échelle des alvéoles est atteint en quelques dizaines d'années, donc avant que celles-ci ne soient totalement saturées, en particulier pour la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés. La température est déjà redescendue autour de 30 °C-35 °C après quelques milliers d'années ;
- l'évolution hydraulique est caractérisée par la production d'hydrogène de corrosion du chemisage et du revêtement métallique. Cette production n'empêche pas les bouchons des alvéoles et la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés d'atteindre un état proche de la saturation totale ( $S > 95\%$ ) en une centaine d'années.

Compte tenu de l'ensemble des considérations évoquées ci-dessus, la présentation de l'évolution chimique des alvéoles est structurée en séparant la partie utile et la tête d'alvéole.

- Concernant la partie utile, on traitera successivement, suivant une logique quasi chronologique avec l'arrivée d'eau au sein de l'alvéole jusqu'à l'intérieur des colis :
  - la corrosion des composants métalliques : revêtement, chemisage, et conteneurages,
  - l'évolution chimique de la barrière ouvragée et des argilites en champ proche,
  - la dissolution des matrices des déchets C et le comportement chimique des assemblages de combustibles usés (dissolution des pastilles d'oxydes UOx et MOx, corrosion des gaines et des éléments de structure).
- Concernant la tête d'alvéole, on traitera :
  - la perturbation alcaline du bouchon en argile gonflante et des argilites en champ proche par le béton du bouchon,
  - la dégradation chimique du béton du bouchon.

### **7.3.1 La corrosion du revêtement, du chemisage et des conteneurages en partie utile des alvéoles**

#### **7.3.1.1 Les conditions phénoménologiques de la corrosion : l'hydraulique, le redox et la température**

Comme présentées dans le chapitre 6, les conditions d'humidité relative de l'air dans les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés, après la mise en place des colis et fermées par le bouchon d'exploitation, deviennent rapidement très élevées (~ 100 % d'humidité relative). Ces conditions contribuent au développement précoce des processus de corrosion des revêtements et des chemisages.

La pose du capot d'étanchéité après la mise en place des colis piège de l'air, donc de l'oxygène, au sein des alvéoles. Cet oxygène est consommé par corrosion en quelques années au maximum, de sorte que les conditions redox au sein des alvéoles deviennent anoxiques (Andra, 2005k). La corrosion produit alors de l'hydrogène. Dans le détail, les conditions redox évoluent sur la longueur de l'alvéole, pendant la période d'exploitation : elles restent oxydantes au tout début de la tête d'alvéole du fait de la proximité de la galeries d'accès ouverte et ventilée et deviennent peu à peu anoxiques avec l'éloignement à la galerie. Les conditions redox sont ainsi rapidement anoxiques au niveau de la partie utile des alvéoles. La fermeture des galeries d'accès efface rapidement cette composante oxydante en tête d'alvéole et l'ensemble de l'alvéole évolue alors en conditions anoxiques.

Les quantités d'oxygène piégées dans l'alvéole avec la pose du capot d'étanchéité et celle du bouchon sont faibles. Les épaisseurs de métal corrodées (inférieures au millimètre) sont négligeables par rapport aux épaisseurs pluricentimétriques des composants métalliques.

Pendant la période thermique, les cinétiques de corrosion en conditions anoxiques sont augmentées d'un facteur 4 à 90 °C et d'un facteur 2 à 60 °C par rapport à celles à la température géothermale naturelle de 22 °C. Compte tenu de la décroissance de la température dès quelques dizaines d'années dans les alvéoles, l'effet de la charge thermique sur la cinétique de corrosion est limité.

#### **7.3.1.2 L'organisation de la corrosion des composants métalliques dans le temps**

D'une façon générale, la corrosion des différents composants métalliques s'organise dans le temps suivant leurs pertes d'étanchéité successives : (i) d'abord la corrosion du revêtement dans les alvéoles de combustibles usés (faces interne et externe) et du chemisage (face externe), (ii) puis, après la perte

d'étanchéité du chemisage<sup>8</sup>, la corrosion du chemisage par ses deux faces et de la face externe des conteneurages et (iii) enfin, après la perte d'étanchéité des conteneurages, la corrosion de sa face interne, de l'enveloppe en acier inoxydable du colis primaire de déchets C et de l'insert des colis de combustibles usés.

La perte d'étanchéité des chemisage, revêtement et conteneurages est principalement d'origine mécanique : la corrosion diminue progressivement les épaisseurs des composants métalliques jusqu'à ce que ces derniers ne puissent soutenir les contraintes mécaniques auxquelles ils sont soumis. À ce stade, ils se déforment et se rompent localement (cf. § 8).

La corrosion généralisée en milieu réducteur (Encadré 7.3) entraîne la formation de produits de corrosion expansifs aux interfaces des composants métalliques, notamment : (i) au contact des argilites du Callovo-Oxfordien avec le revêtement des alvéoles de combustibles usés et le chemisage des alvéoles de déchets C, (ii) au contact de la barrière ouvragée en argile gonflante avec le revêtement des alvéoles de combustibles usés et (iii) au contact entre le chemisage et les conteneurages. Associée au fluage des argilites et au gonflement de la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés lors de sa resaturation (cf. § 6), la formation de ces produits de corrosion contribue à l'établissement d'un contact direct entre les divers composants métalliques et entre ces composants et les milieux argileux (argilites et barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés). Ceci favorise l'instauration de cinétiques de corrosion faibles entre 2 et 5  $\mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$  environ au maximum (Crusset, 2005).

Le revêtement de 30 mm d'épaisseur des alvéoles de combustibles usés se corrode par ses deux faces. La durée de sa corrosion totale est estimée à quelques milliers d'années.

Que cela soit dans les alvéoles de déchets C ou dans les alvéoles de combustibles usés, le chemisage se corrode par sa face externe en au moins 1 000 ans environ (Crusset, 2005) (Figure 7.3.1 et Figure 7.3.2) avant qu'il ne perde son étanchéité par déformation et rupture mécanique (cf. § 8). Dès lors, la face interne du chemisage peut elle aussi se corroder ainsi que les conteneurages des colis de stockage de déchets C et des colis de combustibles usés. La resaturation des jeux internes au chemisage est, dans un premier temps, limitée par la production d'hydrogène par corrosion en milieu anoxique. Les déformations mécaniques de compression et la formation de produits de corrosion expansifs (magnétite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), sidérite ( $\text{FeCO}_3$ ),...), contribuent à la résorption des jeux. La saturation à l'intérieur du chemisage augmente et la corrosion de la face interne du chemisage et de la face externe des conteneurages des colis peuvent s'amorcer significativement. Quelques milliers d'années sont nécessaires à la corrosion totale du chemisage. 4 000 à 5 000 ans environ sont ainsi nécessaires à la corrosion totale du revêtement et du chemisage.

Les épaisseurs des conteneurages des colis de déchets C et des colis de combustibles usés permettent d'obtenir des durées d'étanchéité respectives de 4 000 ans et 10 000 ans. Par conception, les épaisseurs totales des conteneurages ont été déterminées suivant une approche conservatrice tant pour la corrosion en terme de cinétique que pour la tenue mécanique en terme de sollicitation. C'est ainsi que l'épaisseur de 55 mm des surconteneurs de déchets C est constituée d'une épaisseur de corrosion (27 mm) et d'une épaisseur mécanique (28 mm). L'approche phénoménologique développée dans le présent document tant pour la corrosion que pour l'évolution mécanique conduit à des durées d'étanchéité plus grandes que les durées de 4 000 ans et 10 000 ans : elles sont de l'ordre de 15 000 ans pour le surconteneur de colis de déchets C et de 30 000 ans pour le conteneur de combustibles usés dont l'épaisseur initiale est plus grande (110 mm pour les combustibles usés CU1 et 120 mm pour les combustibles usés CU2) (Crusset, 2005). Dans la suite du document, on prendra en référence les valeurs de 4 000 et 10 000 ans et on traitera par écart les valeurs phénoménologiques lorsque cela est justifié. L'évolution de l'intérieur des conteneurages est décrite plus loin pour les déchets C (cf. § 7.3.4) et pour les combustibles usés (cf. § 7.3.5).

<sup>8</sup> L'étanchéité du chemisage n'est pas spécifiée. Toutefois, le principe d'une jonction par soudure des différents tronçons constituant le chemisage conduit à considérer ce dernier comme étanche dans l'analyse de l'évolution phénoménologique des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés

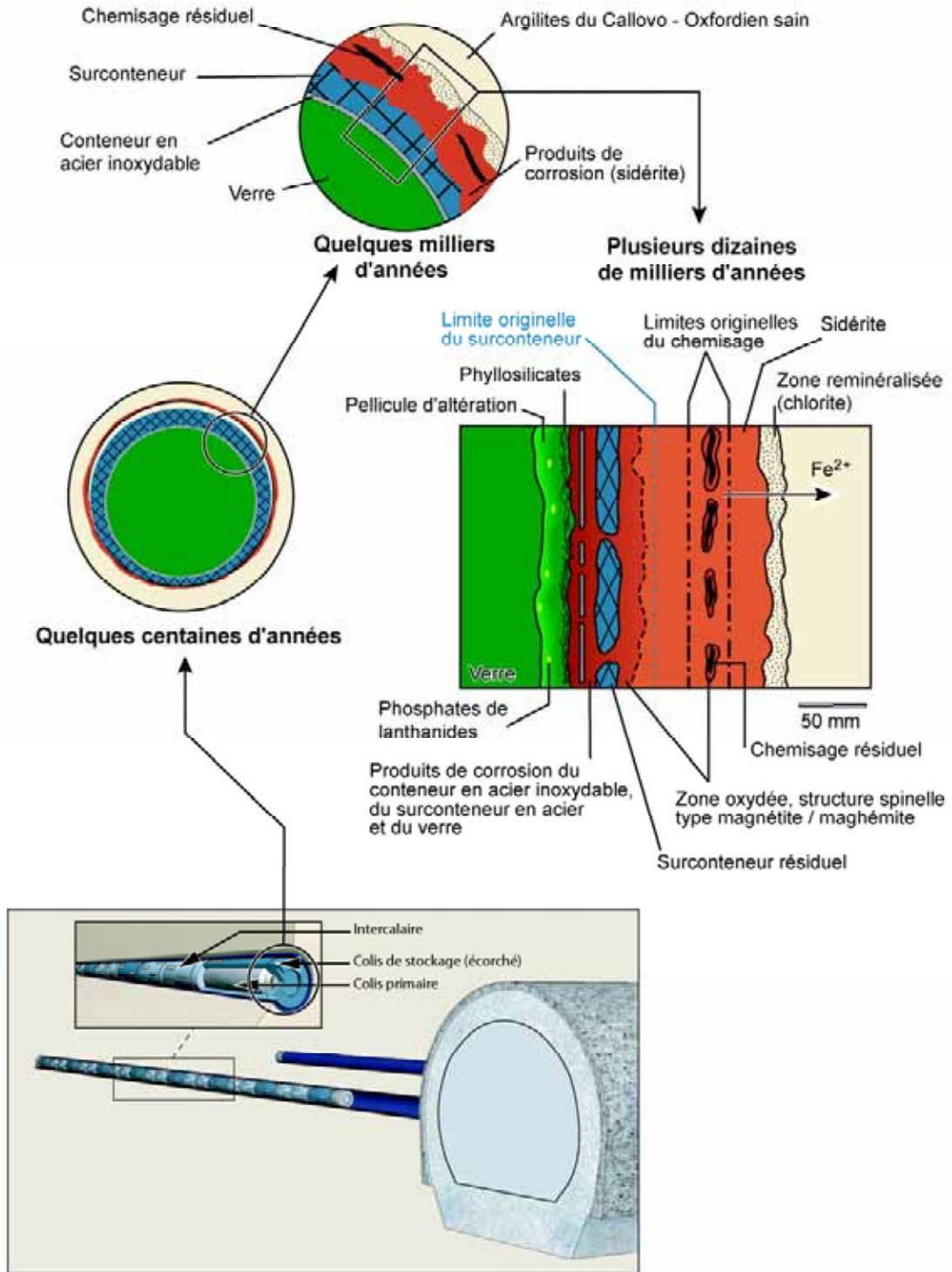


Figure 7.3.1 Représentation schématique de la corrosion du chemisage et du surconteneur dans une alvéole de déchets C, à quelques centaines d'années, quelques milliers d'années et plusieurs dizaines de milliers d'années

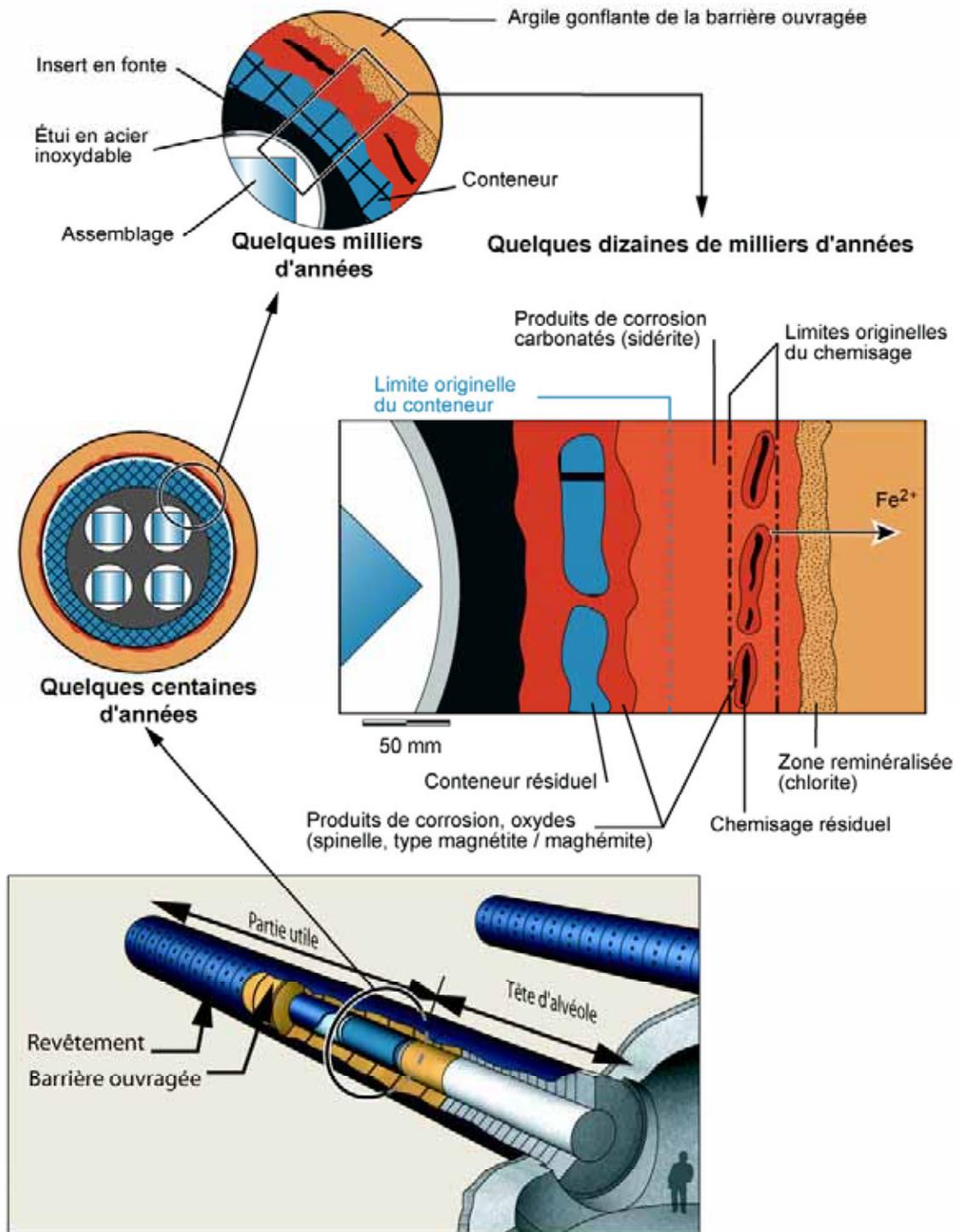


Figure 7.3.2 Représentation schématique de la corrosion du chemisage, du conteneur et de l'insert dans une alvéole de combustibles usés, à quelques centaines d'années, quelques milliers d'années et plusieurs dizaines de milliers d'années

### 7.3.2 L'évolution chimique de la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés

Dès la resaturation et par la suite, la barrière ouvragée argileuse des alvéoles de combustibles usés interagit avec les eaux du Callovo-Oxfordien et les composants métalliques (revêtement, chemisage).

#### 7.3.2.1 La mise en équilibre avec les eaux des argilites du Callovo-Oxfordien et l'effet de la température

La barrière ouvragée se met progressivement à l'équilibre chimique avec les eaux des argilites. Cela se traduit principalement par des processus d'échange d'ions et de protonation / déprotonation. En effet, les deux types de matériaux argileux (argile gonflante et argilites) sont constitués de phases minérales similaires (Encadré 2.6, Tableau 3.3.1) et possèdent, à l'équilibre, des chimies des eaux proches. Ainsi, la mise en équilibre de l'argile gonflante de la barrière ouvragée avec les eaux des argilites n'entraîne pas de modifications importantes de sa cristallographie et de la chimie des eaux interstitielles.

Ce processus de mise à l'équilibre se déroule sur une durée de l'ordre de la dizaine de milliers d'années, notamment en lien avec les cinétiques de transfert des solutés dans les argilites en champ proche et dans l'argile gonflante. Toutefois, les évolutions des paramètres chimiques majeurs des eaux de l'argile gonflante (pH, Eh, carbonates, sodium, calcium...) associées à ce processus sont limitées (Giffaut & Coelho, 2005 ; Nagra, 2002b). Les modifications minéralogiques concernent la dissolution des minéraux secondaires dans l'argile gonflante (calcite, gypse, sidérite) et l'échange d'ions Na / Ca entraîne l'évolution de la montmorillonite sodique initiale de l'argile gonflante vers une montmorillonite calcique, la première restant cependant largement majoritaire dans l'argile gonflante lorsque l'équilibre chimique est atteint (Nagra, 2002b).

La charge thermique peut entraîner la précipitation de gypse et la dissolution du quartz contenu dans l'argile gonflante, mais ces processus restent locaux (interface avec le chemisage) et limités, notamment au regard de la faible quantité de quartz dans l'argile gonflante (< 3 %) (Andra, 2005f, Tome 1). De manière générale, la température est un paramètre important du processus d'illitisation qui a pour conséquence la dissolution progressive des minéraux argileux gonflants, et donc la perte des propriétés de gonflement. Toutefois, la faible concentration en potassium dans les eaux des argilites et les températures atteintes dans les alvéoles sur les mille premières années (toujours inférieures à 65 °C sur la face externe de la barrière ouvragée et comprises entre 85 °C et 55 °C au contact avec les conteneurs, cf. § 5) ne sont pas suffisantes pour permettre une illitisation de la barrière ouvragée dans sa masse. En effet, les nombreuses études du processus d'illitisation dans les bassins sédimentaires montrent que celui-ci ne s'initie qu'à des températures supérieures à 80 °C et ne devient significatif qu'au-delà de 100 °C, pour autant qu'il y ait une source en potassium (cf. § 3.3.1.3). L'illitisation de la barrière ouvragée reste donc localisée à l'interface avec le revêtement et les argilites. Les modélisations conduisent à estimer une épaisseur illitisée de la barrière ouvragée d'ordre infracentimétrique (Michau, 2005b). Elle est concomitante à la perturbation fer / argile se développant dans l'argile gonflante au contact du revêtement (cf. ci-dessous). L'influence de la perturbation fer / argile sur l'illitisation n'est pas évaluée à ce jour, mais est très certainement négligeable en raison des mécanismes mis en jeu respectivement dans les deux perturbations.

Ainsi, dans les conditions du stockage, la barrière ouvragée, mise en équilibre avec les eaux interstitielles des argilites du Callovo-Oxfordien, conserve globalement sa minéralogie initiale et une chimie des eaux interstitielles évoluant vers celle des argilites, ce qui préserve ses propriétés hydrauliques, de gonflement et de rétention.

### 7.3.2.2 L'interaction fer / argile

Une perturbation fer / argile se développe au contact des revêtement et chemisage (Figure 7.3.3). Ce processus est intimement lié à la cinétique de corrosion des composants en acier. En effet, la corrosion du métal entraîne la libération progressive de fer dans les eaux de saturation des alvéoles. Ce fer peut diffuser dans l'argile gonflante et réagir avec les minéraux argileux notamment les smectites.

La perturbation fer / argile (Encadré 7.5) est caractérisée dans le matériau argileux par des processus d'échange d'ions et de dissolution/précipitation (Michau, 2005b). Elle progresse par fronts concentriques à partir des interfaces : revêtement / argile gonflante et argile gonflante / chemisage. Les expérimentations couplées aux modélisations actuelles montrent que la perturbation se traduit par la formation d'une première zone fortement reminéralisée au contact des composants métalliques et d'épaisseur centimétrique constituée principalement de chlorite ferrique et d'ankérite. Elle passe progressivement à une seconde zone plus faiblement perturbée caractérisée uniquement par un enrichissement en fer de la smectite et la formation de minéraux secondaires (quartz, feldspath et zéolithes en particulier). Cet enrichissement ne modifie pas les propriétés de gonflement et de rétention de la smectite (Giffaut & Coelho, 2005). Ce second mécanisme affecte la totalité de l'épaisseur de la barrière ouvragée et ce, en quelques dizaines de milliers d'années.

Les processus réactionnels ne sont réellement efficaces que lorsque la barrière ouvragée est resaturée (après une centaine d'années environ, § 6) et sont d'autant plus intenses que la température est élevée. Ainsi, la perturbation fer / argile se développe principalement lorsque des conditions favorables de température et de saturation sont réunies, c'est-à-dire pendant les quelques premiers milliers d'années après la fermeture du stockage. Elle se poursuit plus lentement après le transitoire thermique.

L'extension totale des zones reminéralisées, prenant en compte les effets du chemisage et du revêtement, est évaluée par des modélisations chimie / transport à une dizaine de centimètres au maximum, soit 15 % de l'épaisseur de l'argile gonflante. Ce résultat ainsi que les transformations minéralogiques limitées dans le reste de l'argile gonflante ne conduisent pas à une modification des propriétés hydrauliques, de rétention et de gonflement de la barrière ouvragée dans son ensemble sur la durée d'un million d'années.

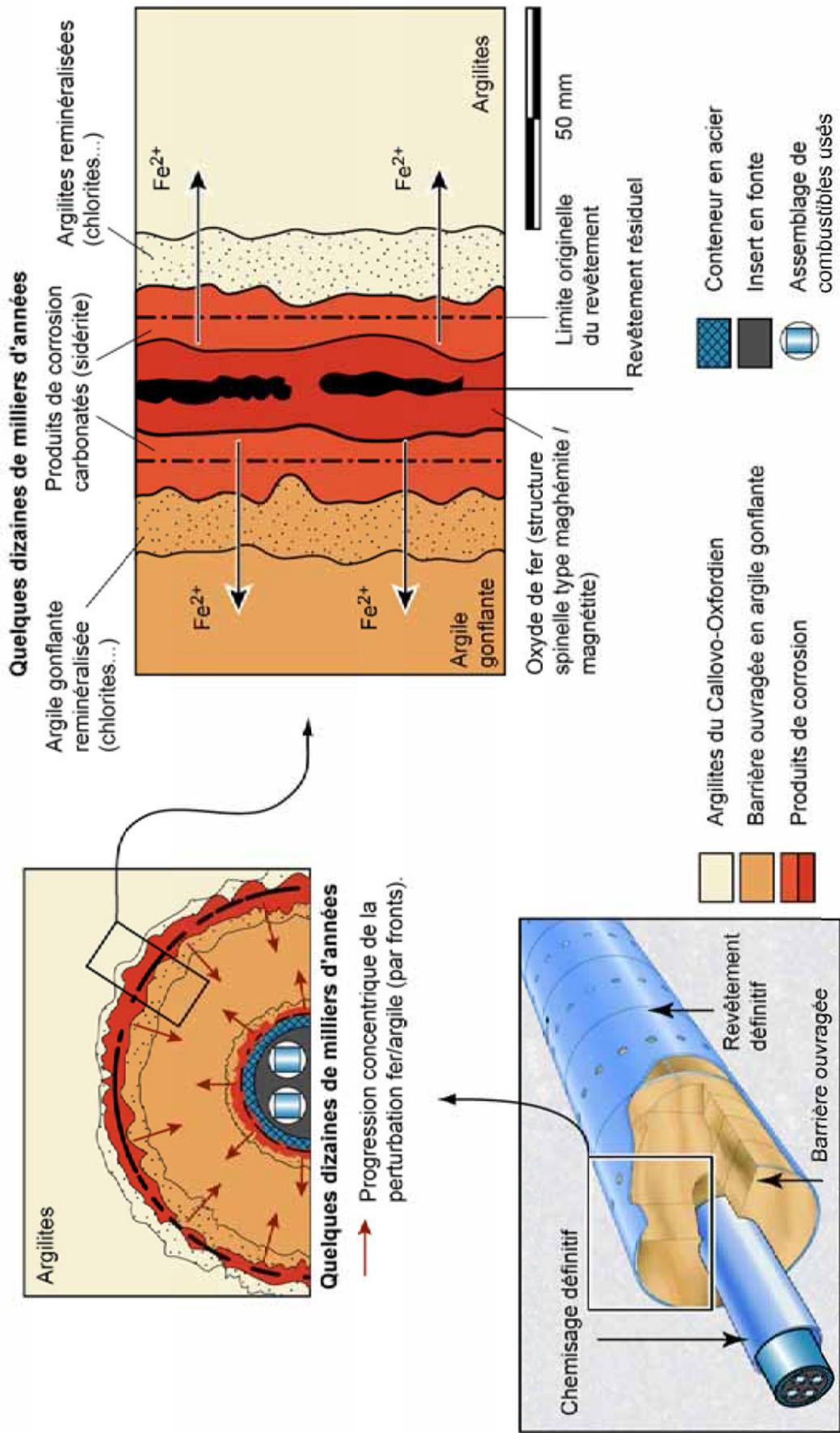


Figure 7.3.3 Représentation schématique de la perturbation fer / barrière ouvragée en argile gonflante d'une alvéole de combustibles usés, après quelques dizaines de milliers d'années

### Encadré 7.5 *Les interactions fer (métal) / argile (argilites et argile gonflante...)*

On dispose de peu d'analogues archéologiques concernant l'interaction chimique entre du fer (métal) et des milieux argileux au sens large. Néanmoins, on bénéficie des travaux menés sur les processus naturels de chloritisation diagénétiques (Chamley, 1989). L'évaluation des interactions fer / argile menée à l'Andra allie une approche expérimentale en laboratoire de surface et le développement de modèles réactionnels thermodynamiques et cinétiques (Michau, 2005b).

#### *Le processus*

La dégradation de l'argile au contact de fer métal dans des conditions saturées et anoxiques se caractérise par des processus d'échanges d'ions, la transformation des espèces minérales constitutives de l'argile initiale (Encadré 2.6) et la précipitation de phases secondaires.

- Les processus d'échanges d'ions en surface des smectites initiales conduisent à l'adsorption de fer pouvant mener à la précipitation de surface de Fe<sup>III</sup> (Giffaut & Coelho, 2005 ; Tournassat, 2003). Cette étape est peut-être une phase transitoire avant les modifications minéralogiques.
- Les transformations minéralogiques se traduisent tout d'abord par la dissolution de la montmorillonite (argile 2:1 dioctaédrique) présente dans l'argile gonflante initiale au contact avec le matériau métallique.

Parallèlement, les études expérimentales indiquent la formation dans un premier temps de *nontronites* (argiles 2:1 dioctaédrique, (SiAl)<sub>4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>Na<sub>0,3</sub>·4H<sub>2</sub>O) correspondant encore à un état partiellement oxydé, puis de *berthiérines* (argiles 1:1 trioctaédrique, (SiAl)Fe<sub>2</sub><sup>II</sup>AlO<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) précurseurs de *chlorites* ferro-magnésiennes (argiles 2:1, (FeMgAl)<sub>6</sub>(SiAl)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>) (Andra, 2005f, Tome 1 ; Michau, 2005b).

En raison des températures à considérer dans le stockage et de la lente cinétique des transformations minéralogiques susceptibles d'intervenir à plus long terme, celles-ci ne peuvent être approchées que par des expérimentations à haute température (300 °C) et à court terme. En présence de produits de corrosion ou en l'absence d'apport en fer métal, elles indiquent que la montmorillonite évolue vers une smectite de type *saponite* ferromagnésienne (argile 2:1 trioctaédrique, (NaCa<sub>0,5</sub>)<sub>0,3</sub>(MgFe<sup>II</sup>)<sub>3</sub>(SiAl)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O). Avec une source en fer métal, il se forme des *chlorites* de plus en plus ferrifères à proximité de cette source (Guillaume, 2002 ; Guillaume *et al.*, 2003).

Avec des eaux riches en carbonates et en calcium, comme dans les argilites du Callovo-Oxfordien, il se forme au contact de la source en fer des carbonates mixtes Fe-Ca de type ankérite (Ca(FeMgMn)(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>). On note également la néoformation de quartz, de feldspath et de zéolithes alors que les carbonates et les phosphates de l'argile se dissolvent (Michau, 2005b).

#### *L'organisation de la perturbation dans l'espace*

En conditions de transfert des solutés par diffusion dominante, le processus de la perturbation fer / argile se propage par fronts au contact du métal. Les processus d'échange d'ions sont très rapides avec l'arrivée du panache ferrifère dans les argiles. En revanche, les transformations minéralogiques ont une cinétique lente, en particulier pour des températures inférieures à 100 °C, ce qui limite l'extension de la perturbation à l'interface avec le métal.

### 7.3.3 L'évolution chimique des argilites en champ proche des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés

De même que pour la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés, une perturbation fer / argilites se développe dans les argilites au contact avec les composants métalliques (chemisage des alvéoles de déchets C et revêtement des alvéoles de combustibles usés).

Les mécanismes réactionnels et cinétiques mis en jeu dans la perturbation fer / argilites sont semblables à ceux décrits pour la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés : formation d'une zone fortement reminéralisée au contact des composants métalliques, puis d'une seconde zone faiblement perturbée jusqu'à atteindre une zone non affectée par le fer.

La perturbation débute dès la mise en place des composants métalliques, notamment parce que les argilites en champ proche des alvéoles sont saturées et restent proches de l'état totalement saturé même pendant la période de production et de migration d'hydrogène (cf. § 6). Elle se poursuit (i) jusqu'à la corrosion complète du revêtement, soit plusieurs milliers d'années, dans les alvéoles de combustibles usés et (ii) jusqu'à la corrosion complète non seulement du chemisage, mais aussi du surconteneur, soit au-delà de la dizaine de milliers d'années, dans les alvéoles de déchets C.

Comme pour la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés, la perturbation fer / argilites se développe essentiellement pendant la période thermique (quelques milliers d'années à la dizaine de milliers d'années). Au-delà de cette période, elle évolue très lentement. Par ailleurs, elle cesse après quelques dizaines de milliers d'années avec la corrosion totale des composants métalliques mis en jeu (cf. ci-dessus). On peut donc considérer que sur le million d'années, l'extension de la perturbation reste proche de celle acquise à la fin de la période thermique.

Les similitudes minéralogiques entre les argilites et les argiles gonflantes permettent d'estimer que les extensions de la perturbation liée aux interactions avec le fer sont similaires pour les deux milieux. L'extension de la zone très fortement reminéralisée est d'ordre centimétrique, celle de la zone faiblement perturbée pluridécimétrique. L'extension de la zone fortement reminéralisée est donc largement inférieure à celle de l'EDZ initiale. Les mécanismes mis en jeu au-delà de la zone fortement reminéralisée conduisent à estimer que la perturbation n'affecte pas les propriétés hydrauliques, chimiques et mécaniques des argilites microfissurées et saines du Callovo-Oxfordien.

#### 7.3.4 La dissolution de la matrice vitreuse

Les colis de déchets C sont constitués d'une matrice en verre alumino-borosilicaté sodique et de déchets. Ces derniers sont constitués de fines résultant pour l'essentiel d'insolubles de dissolution (RuO<sub>2</sub>, Rh et Pd), de concentrats de produits de fission et de résidus d'actinides. Lors de la fusion, ils deviennent partie intégrante de la structure vitreuse.

Les composants majeurs de ces verres sont SiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Na<sub>2</sub>O (Encadré 7.6). Les autres oxydes principaux sont, en fonction de la composition chimique des solutions des produits de fission et de l'origine des combustibles retraités, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO et MgO. Les verres C0.2 (UMo) sont enrichis en molybdène et les verres C4 plus riches en plutonium. Les teneurs en déchets incorporés dans les verres sont inférieures à 18,5 %, avec une teneur moyenne de ~ 12,8 % pour les verres R7T7 (Andra, 2005d).

##### 7.3.4.1 Le comportement de la matrice vitreuse avant la rupture du surconteneur

Avant la perte d'étanchéité du surconteneur, la matrice vitreuse évolue dans une atmosphère fermée sèche. La seule dégradation alors possible en l'absence d'eau est l'auto-irradiation  $\alpha$  et  $\beta\gamma$ .

Pour les verres de type R7T7 (colis types C1 et C2), il y a peu d'effet des rayonnements  $\beta\gamma$ , majoritaires pendant la période d'exploitation (pas de production significative d'hélium, pas de diffusion significative des éléments mobiles). Pour les colis types C0 (déchetts PIVER, UMo R7 et AVM), les contenus radiologiques sont plus faibles que pour les colis types C1 et C2 et les effets de l'auto-irradiation sont quasi nuls. Pour les colis types C3 et C4 (déchetts vitrifiés UOX / MOX et déchetts Pu vitrifiés), les effets de l'auto-irradiation sont en cours d'étude.

En ce qui concerne l'auto-irradiation  $\alpha$ , la production d'hélium moyenne pour les différents types de colis de déchets C est d'environ 1 mole par colis en 15 000 ans (Talandier, 2005). Pour les verres C1 et C2 la production d'hélium n'entraîne pas une fracturation mécanique du verre. Pour les verres C3 et C4 qui ne sont pas encore produits (déchetts vitrifiés UOX / MOX et incorporant une faible quantité de Pu), les effets de l'auto-irradiation sont en cours d'étude (Andra, 2005d).

### Encadré 7.6 *La structure des verres (boro)silicatés*

#### **Introduction**

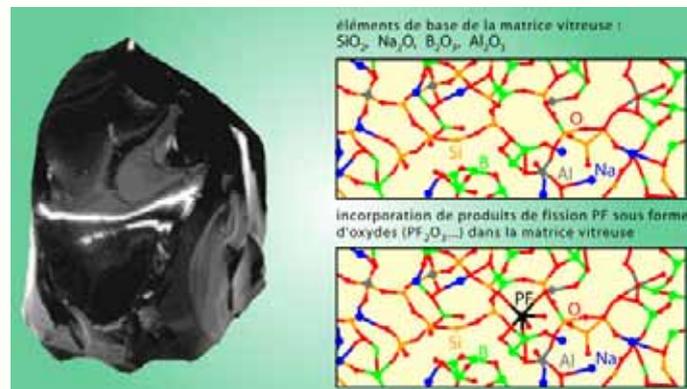
La structure des matériaux vitreux silicatés est étudiée depuis presque un siècle (Zachariensen, 1932 ; Zachariensen, 1933), en particulier par les industries verrière et nucléaire, afin de comprendre au mieux les propriétés de durabilité chimique des verres et de les optimiser. D'un point de vue physico-chimique, un verre est un liquide surfondu figé, donc avec une structure amorphe (Scholze, 1991 ; Zarzycki, 1982). Par ailleurs, le développement d'outils d'analyses performants (diffraction de neutrons (Wright, 1994), spectroscopie infrarouge en réflexion (Geotti-Bianchini & De Riu, 1995 ; Geotti-Bianchini *et al.*, 1991), modélisation par dynamique moléculaire (Aertsens & Van Iseghem, 1996 ; Ganster, 2004 ; Ledieu, 2004),...) a permis d'affiner au cours du temps les observations jusqu'à la proposition d'un modèle de structure générale. Ce modèle est indispensable à la compréhension des processus de dissolution.

#### **La structure**

Le squelette tridimensionnel des verres silicatés est constitué par des tétraèdres  $\text{SiO}_4$  (Scholze, 1991 ; Zachariensen, 1932 ; Zarzycki, 1982). Il est modifié par l'introduction d'alcalins ou d'alcalino-terreux. Un verre silicaté possède ainsi trois types de cations différents, les cations formateurs du réseau (Si, B, P,...), les cations modificateurs du réseau (Li, Na, K, Mg, Ca, Ba,...) et les cations intermédiaires qui peuvent être formateurs ou modificateurs selon la composition du verre (Al, Pb, Zn, Ti, Fe,...).

D'une façon générale, les cations formateurs du réseau vitreux sont des cations pouvant adopter un environnement tétraédrique et sont reliés entre eux par des oxygènes pontants. Les cations modificateurs entraînent la rupture de la chaîne tétraédrique du réseau avec l'apparition d'oxygènes non pontant, reliant un atome formateur et un atome modificateur du réseau. Il n'est pas toujours possible d'assigner à tous les cations l'un ou l'autre de ces deux types et certains peuvent adopter des configurations mixtes, d'autres peuvent changer de type selon la composition du verre. Ceux-ci sont alors dits intermédiaires.

Dans les verres nucléaires, les radionucléides et les toxiques chimiques sont incorporés dans la structure du verre en tant qu'éléments formateurs ou modificateurs selon leur structure électronique (cf. Figure ci-dessous, Andra, 2005d).



Photographie d'un morceau de verre R7T7 et schéma de la structure vitreuse

#### 7.3.4.2 Les déchets C après la rupture du surconteneur

La perte d'étanchéité du surconteneur des déchets C (cf. § 7.3.1) permet la resaturation progressive des jeux internes et l'amorce de la corrosion de la face interne du surconteneur et de l'enveloppe primaire en acier inoxydable du colis de déchets C. La perte d'étanchéité de l'enveloppe primaire est atteinte rapidement du fait des contraintes mécaniques, de sorte que l'eau peut entrer en contact des déchets quasi simultanément à la rupture du surconteneur.

Toutefois, en raison de la poursuite de la production d'hydrogène sur plusieurs dizaines de milliers d'années, la saturation totale ( $S = 100\%$ ) à l'intérieur du surconteneur ne sera atteinte qu'après cette période. Néanmoins, la chute des flux de production d'hydrogène après 10 000 ans conduit à un degré de saturation supérieur à 90 % à l'intérieur du colis.

La cinétique de dissolution des matrices vitrifiées est pilotée par les conditions thermiques et la chimie des eaux au contact du verre. Elle dépend également de la composition chimique du verre. En revanche, les processus d'auto-irradiation  $\alpha$  et  $\beta\gamma$ , qui se poursuivent depuis la fabrication des colis vitrifiés, n'influencent pas la cinétique de dissolution des verres, du fait essentiellement de la forte capacité d'autoguérison de la matrice vitreuse (Andra, 2005d).

Dans l'alvéole de déchets C, au moment de l'arrivée de l'eau au contact du verre (*a minima* 4 000 ans), les conditions thermiques sont redevenues suffisamment faibles, inférieures à 50 °C, pour ne pas modifier significativement les cinétiques de dissolution (Bauer, 2005). Au-delà, la température décroît rapidement et se situe à 25-30 °C vers 10 000 ans.

Les cinétiques de dissolution de la matrice vitreuse sont aussi influencées par les matériaux situés au contact direct des verres et donc par la présence des produits de corrosion du conteneur primaire, du surconteneur et du chemisage. Seule la partie externe du verre (surface) subit cette influence. Ces matériaux interviennent sur la chimie de l'eau au contact des déchets de par leurs propriétés de rétention de la silice. Ainsi, la chimie des eaux interstitielles au cœur du verre est peu sensible à l'environnement immédiat des colis (produits de dégradation des aciers) du fait de leur éloignement (Andra, 2005d).

La dissolution de la matrice vitreuse (Encadré 7.7) s'effectue selon trois étapes successives : (1) la dissolution sélective des éléments les plus solubles (bore, alcalins). Cette étape est courte, de l'ordre de quelques jours ; (2) la dissolution du verre avec une vitesse  $V_0$  linéaire. Cette phase peut durer quelques années à quelques dizaines d'années ; (3) une diminution rapide de la vitesse jusqu'à l'atteinte d'une vitesse résiduelle très faible ( $V_r$ ). L'enchaînement entre les étapes 2 et 3 est dénommé  $V_0 \rightarrow V_r$ . La phase de transition entre ces deux étapes est de durée très courte et peut être négligée dans la représentation temporelle du processus de dissolution de la matrice vitreuse.

Les cinétiques de dissolution des différents verres (cf. § 2.3) et leurs évolutions ont été évaluées à partir de nombreuses expérimentations se déroulant pour certaines sur plusieurs années et de modèles développés à partir de ces dernières. Les durées de dissolution totale estimées à ce jour pour les verres PIVER, UMo R7 et AVM (respectivement colis types C0.1, C0.2 et C0.3) sont de l'ordre de quelques milliers d'années (Andra, 2005d). Pour les verres de type R7T7 (colis types C1 et C2) et les déchets vitrifiés UOX / MOX et Pu (colis types C3 et C4), la dissolution du verre basée sur le modèle  $V_0 \rightarrow V_r$  conduit à la dissolution totale du verre en au moins 300 000 ans. Les études récentes semblent indiquer une perspective de diminution de  $V_r$  avec le temps et la température (Andra, 2005d) (Figure 7.3.4).

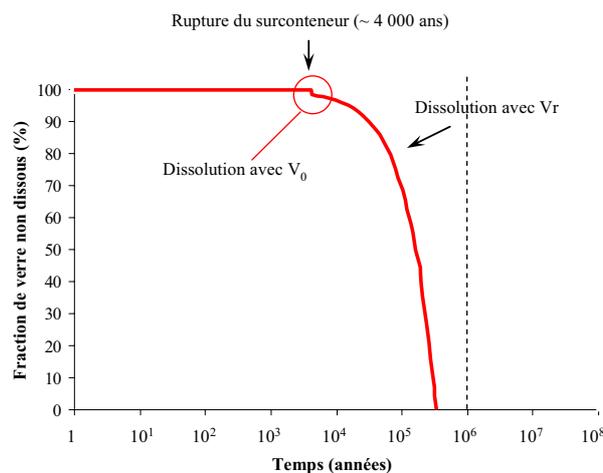


Figure 7.3.4 Représentation simplifiée de la dissolution d'un verre R7T7 (colis types C2) dans le temps (Andra, 2005m)

### Encadré 7.7 Les phases de dissolution des verres silicatés

#### Introduction

La question de la compréhension du comportement des verres silicatés en milieu aqueux se pose à la communauté scientifique depuis de nombreuses années. Différentes approches ont été proposées afin de caractériser les processus de dissolution des verres nucléaires borosilicatés (Advocat *et al.*, 1990 ; Advocat *et al.*, 2001 ; Andra, 2005d ; Bourcier *et al.*, 1990 ; Grambow, 1985 ; Grambow & Müller, 2001 ; Jégou *et al.*, 2000) et les études des analogues naturels des verres nucléaires (verres basaltiques) ont servi pour vérifier ces approches. Des programmes européens se sont également intéressés à la question de la dissolution des verres nucléaires dont GLASTAB (Andra, 2005d), CORALUS, GLAMOR,... D'une façon générale, l'évolution de la cinétique de dissolution des verres fait l'objet d'un consensus sur le plan international, néanmoins, les phénomènes pilotant cette cinétique sont encore sujets à débat.

#### Le processus et sa cinétique

La dissolution d'un verre nucléaire (Encadré 7.6) se produit en deux étapes successives (cf. Figure) :

- Tout d'abord, le **phénomène d'interdiffusion** correspond à un échange d'ions entre les espèces hydrogénées présentes dans la solution et les éléments les moins liés au réseau, les cations modificateurs du réseau. Lors de ces réactions, le réseau silicaté reste intact (dissolution incongruente). La cinétique de l'interdiffusion évolue en racine carrée du temps (processus piloté par la diffusion). Ce processus est rapide et est marqué ensuite par l'**hydrolyse du réseau silicaté**. Ce processus entraîne une dissolution congruente du verre avec une vitesse linéaire dite  $V_0$ . Le passage entre ces deux processus correspond à une compétition entre les processus d'échange d'ions et, avec l'augmentation de l'épaisseur du verre hydraté et désalcalinisé et le ralentissement de ce processus, le processus d'hydrolyse. La durée de cette première étape dépend en particulier de la présence à proximité des colis de verre de produits de corrosion des conteneurs (Andra, 2005d ; Nagra, 2003b) et est estimée à quelques années à quelques dizaines d'années.
- La deuxième étape correspond à la **formation de produits d'altération du verre** (Encadré 7.8). Lors de cette étape, la cinétique de dissolution diminue avec l'accumulation des produits d'altération pour tendre rapidement vers une vitesse résiduelle. Ce transitoire correspond (i) à la modification de la composition de la solution entraînant l'augmentation des teneurs en silice en solution et ainsi une modification de l'affinité entre le verre et la solution et (ii) à la formation de produits secondaires, dont la pellicule d'altération. Ces deux processus conduisent au ralentissement des échanges entre la surface du verre et la solution et permettent d'atteindre rapidement une vitesse de dissolution résiduelle ( $V_r$ ) très faible, mais jamais nulle.

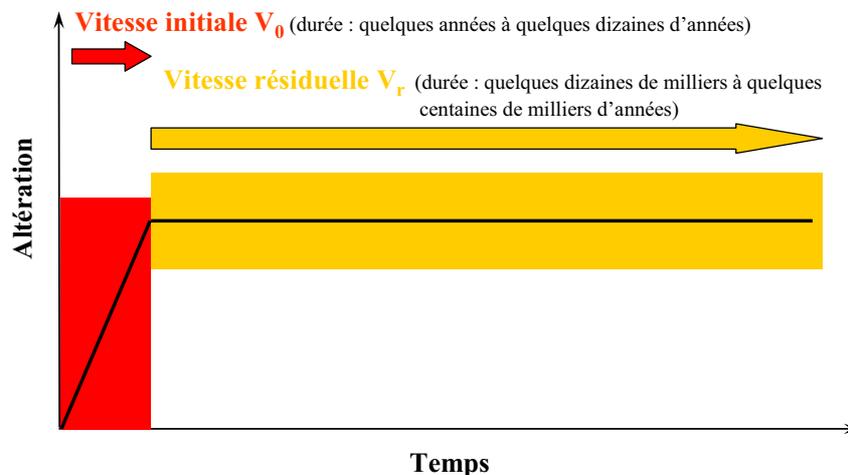


Schéma de l'évolution de la cinétique de l'altération d'un verre nucléaire (d'après Andra, 2005d)

### Encadré 7.8 *La dissolution des verres silicatés*

#### **Introduction**

Les produits d'altération des verres nucléaires et leur évolution ont été largement étudiés en s'appuyant sur l'analyse des produits de dégradation des verres basaltiques considérés comme des analogues naturels (Grambow *et al.*, 1985 ; Lutze *et al.*, 1985 ; Malow & Ewing, 1981 ; Techer *et al.*, 2000). Parallèlement à l'étude des analogues naturels, des modèles permettant de représenter de façon satisfaisante la formation de ces produits d'altération ont été développés (Advocat, 1991 ; Advocat *et al.*, 2001 ; Bourcier *et al.*, 1990 ; Caurel *et al.*, 1990 ; Crovisier *et al.*, 1989 ; Grambow *et al.*, 1985 ; Michaux *et al.*, 1992 ; Munier *et al.*, 2004).

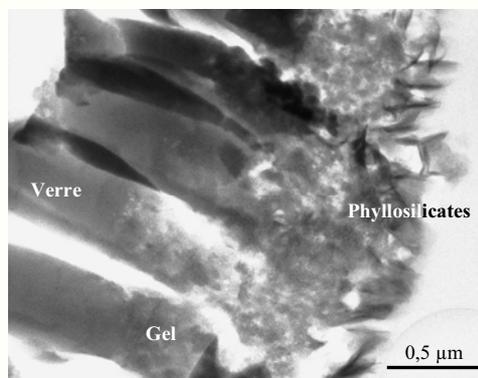
#### **Les produits d'altération**

Les produits d'altération sont constitués d'une phase amorphe appelée « la pellicule d'altération » et de composés externes plus ou moins cristallisés.

La **pellicule d'altération** se forme très rapidement après l'arrivée de l'eau au contact du verre nucléaire et l'initiation de sa dissolution. Sa formation consiste soit à la recombinaison *in situ* d'une partie des éléments les moins solubles du verre après hydrolyse du verre à l'interface verre sain / pellicule d'altération, soit à la précipitation d'un composé amorphe correspondant à l'atteinte en solution d'un produit de solubilité. Le développement plus ou moins rapide de ces deux mécanismes dépend de la nature des éléments retenus dans la pellicule et des conditions de l'altération.

L'ensemble des caractéristiques chimiques et hydrauliques de la pellicule d'altération (texture, porosité, composition, chimique, propriétés de diffusion...) est directement influencé par la composition du verre, ses conditions de formation et par l'environnement du colis (Andra, 2005d). Un certain nombre de facteurs externes interviennent sur le caractère protecteur de la pellicule d'altération : le pH dont l'augmentation tend à influencer la dissolution du verre, l'augmentation du rapport S / V (surface du verre / volume de la solution), le taux de fracturation, le débit d'eau altérante et la réactivité physico-chimique des matériaux au contact du verre. La composition de la solution altérante intervient peu, si ce n'est au travers des teneurs en silice ou en magnésium par exemple.

En plus de la pellicule, et de façon générale, **les premiers produits d'altération** plus ou moins cristallisés observés lors de l'altération d'un verre nucléaire en phase aqueuse et en température **sont des silicates de type smectite** (Caurel *et al.*, 1990). Les expérimentations à haute température de dissolution du verre R7T7 (~ 250 °C) montrent la formation également de l'analcime ( $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), de zéolithes et de silicates de calcium hydratés (tobermorite ( $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) ou gyrolite ( $\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )). Pour des états d'altération plus avancés, les produits de dégradation des verres nucléaires se rapprochent de ceux des verres basaltiques (Grambow *et al.*, 1985 ; Lutze *et al.*, 1985 ; Malow & Ewing, 1981).



*Image par microscopie électronique à transmission d'un verre SON68 (i.e. R7T7 non actif) altéré en mode statique pendant 5,7 ans à 90 °C dans de l'eau pure (Ribet *et al.*, 2003)*

### 7.3.5 Les assemblages de combustibles usés

Les assemblages de combustibles usés CU1 et CU2 (respectivement UOX et MOX) sont principalement constitués par des pastilles formées de grains d'oxydes (U-Pu)O<sub>2</sub> (Encadré 7.9). Dans le cas des combustibles usés CU2, des amas de Pu (8,65 % de Pu) sont noyés dans les grains d'UO<sub>2</sub> appauvri (0,225 % <sup>235</sup>U).

Les assemblages contiennent également différents composants de structure : les embouts qui assurent le positionnement en réacteur (zircaloy (alliage zirconium-étain), inconel (alliage NiCrFe)), les tubes guide permettant le guidage des crayons (zircaloy), des grilles d'espacement (acier inoxydable) et les gaines des crayons (zircaloy) (Andra, 2005d).

#### 7.3.5.1 L'état des combustibles usés avant la perte d'étanchéité du conteneur

Tant que l'étanchéité du conteneur est préservée, la pastille d'oxyde évolue peu. En effet, les assemblages se trouvent à l'intérieur des conteneurs dans une atmosphère confinée avec des quantités d'oxygène et de vapeur d'eau faibles à nulles. Il ne peut donc pas y avoir d'oxydation significative des pastilles d'oxydes, ni même une corrosion des éléments métalliques de structure des assemblages. En outre, la diminution de la température après la sortie du réacteur n'entraîne pas de modification de l'état d'oxydation des pastilles d'oxydes et d'amorphisation (Andra, 2005d). La décroissance  $\alpha$  jusqu'à la perte d'étanchéité entraîne la production d'hélium (Andra, 2005k). Cet hélium, produit principalement dans les grains d'oxydes, peut diffuser par *Diffusion Accélérée par l'Auto-Irradiation Alpha* (D3AI) jusqu'aux joints de grains. Il peut être alors libéré dans les crayons, notamment à l'interface entre les gaines et les pastilles d'oxyde et en partie supérieure des crayons. Avec le refroidissement des crayons après la sortie du réacteur, les gaines sont susceptibles de se fissurer (hydruration, fluage à sec...), ce qui permet la libération de l'hélium en dehors des crayons dans les jeux au sein du conteneur. La température et la pression exercées dans les conteneurs par le dégagement d'hélium au moment de la perte d'étanchéité à 10 000 ans sont de l'ordre de 0,15 MPa pour les CU1 et de 0,78 MPa pour les CU2. Pour la durée d'étanchéité phénoménologique estimée à 30 000 ans, cette pression d'hélium serait de l'ordre de 0,25 MPa pour les CU1 et d'environ 1,2 MPa pour les CU2 (Talandier, 2005). De telles pressions n'ont aucune influence sur la tenue mécanique de l'insert et du conteneur.

**Encadré 7.9 La structure des pastilles d'oxydes et des gaines des assemblages de combustibles usés**

La caractérisation et l'étude du comportement des combustibles usés font l'objet de programmes de recherche tant en France (programme Precci mené conjointement par le CEA et EDF), qu'en Europe (programme SFS) (Andra, 2005d).

**Les pastilles d'oxydes**

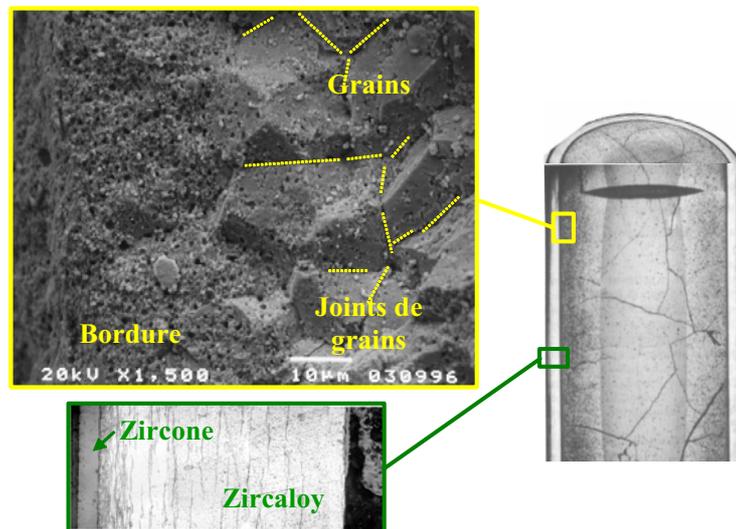
Les crayons qui constituent un assemblage de combustibles usés sont formés d'une gaine en zircaloy dans laquelle sont empilées des pastilles d'oxyde d'uranium (combustible UOX) ou d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (combustible MOX). Ces pastilles sont composées de grains d'oxyde d'uranium  $UO_2$  (colis types CU1 : assemblage UOX / URE) ou de grains d'oxyde mixte  $(U-Pu)O_2$  (colis types CU2 : assemblage MOX).

Pour les combustibles UOX (CU1), lors du passage en réacteur et pour des taux de combustion élevés ( $> 40 \text{ GWj.t}^{-1}$ ), la microstructure des pastilles évolue. Une bordure appelée « rim » de quelques centaines de  $\mu\text{m}$  d'épaisseur se forme en périphérie des pastilles. Au sein de cette bordure, la taille des grains d'oxydes a diminué ( $< 1 \mu\text{m}$ ) par rapport à leur taille initiale avant passage en réacteur (environ  $9 \mu\text{m}$ ) (cf. Figure ci-dessous). Au centre des pastilles, la taille des grains a au contraire augmenté (Andra, 2005d).

Dans le cas des combustibles MOX (CU2), le passage en réacteur n'entraîne pas la formation d'une microstructure de type « rim » au sein des amas d'oxydes mixtes. La taille des amas de Pu peut atteindre  $20 \mu\text{m}$  ; ils sont noyés dans une pastille d'oxyde d'uranium dont la taille des grains est de  $7 \mu\text{m}$  environ.

**La gaine**

La gaine et les matériaux de structure (grilles, ressorts, araignée,...) sont essentiellement en zircaloy. Le passage en réacteur entraîne la formation d'une couche de zircone à leur surface.



Mise en évidence de la structure d'un crayon de combustible usé UOX (section verticale, à droite) : a) image par microscopie électronique à balayage d'une région proche de la gaine (à gauche, en haut) ; b) vue d'une section de la gaine par microscopie optique (à gauche, en bas)

### 7.3.5.2 Les combustibles usés après la rupture du conteneur

Après une dizaine de milliers d'années, la rupture du conteneur par corrosion (cf. § 7.3.1) entraîne immédiatement le relâchement des gaz contenus dans les assemblages (hélium, radionucléides gazeux) (Andra, 2005d ; Nagra, 2003a ; Talandier, 2005). Ces gaz se sont accumulés avant l'arrivée de l'eau dans les vides du crayon, suite au remplissage du crayon avant la mise en réacteur, à l'irradiation en réacteur et à la décroissance radioactive.

Après la rupture du conteneur, du fait de la production d'hydrogène par corrosion, une dizaine de milliers d'années est encore nécessaire pour que le degré de saturation à l'intérieur du conteneur et en particulier au contact des assemblages soit supérieur à 90 %. En effet, la progression de l'eau jusqu'aux assemblages est ralentie par la forte désaturation des jeux internes de l'insert, entretenue par la production locale d'hydrogène. La mise en contact de l'eau libre avec les assemblages est facilitée par la fermeture des jeux en lien avec la formation des produits de corrosion. La fissuration des gaines, voire la rupture locale des crayons (par fluage à sec avant la perte d'étanchéité ou déformation dès la rupture du conteneur) permet l'entrée de l'eau liquide dans les crayons et son arrivée au contact des pastilles d'oxydes. Dès lors s'initie la dégradation des pastilles d'oxydes U-Pu, des gaines en zircaloy et des matériaux de structure en acier inoxydable et en inconel.

Lors de l'arrivée de l'eau au contact des pastilles d'oxydes, les radionucléides (produits de fission, gaz rares,...) localisés aux joints de grains des pastilles d'oxydes, dans les fissures et les fractures, ou dans les vides au sein des crayons peuvent être immédiatement mis en solution. Cette activité dite labile varie suivant les radionucléides considérés : elle peut ainsi représenter jusqu'à environ 35 % de l'inventaire en  $^{36}\text{Cl}$  ou  $^{135-137}\text{Cs}$  pour les colis types CU2 (Andra, 2005d).

Après la perte d'étanchéité, le rayonnement  $\beta\gamma$  a fortement décru (Andra, 2005a, Situation Zu1\_1). Les pastilles d'oxydes sont alors essentiellement affectées par l'irradiation  $\alpha$  (Andra, 2005k). Cette irradiation  $\alpha$  conduit très localement, jusqu'à une distance de l'ordre de quelques dizaines de micromètres de la surface des grains d'oxydes (Andra, 2005d ; SKB, 1999), à une radiolyse de l'eau donnant lieu à la formation d'espèces oxydantes (essentiellement  $\text{H}_2\text{O}_2$ , Encadré 7.10). Ces espèces entraînent l'oxydation de l'uranium de la valence IV à la valence VI beaucoup plus soluble. La cinétique d'oxydation de l'uranium est donc liée à la décroissance  $\alpha$  et à la quantité d'espèces oxydantes formées par radiolyse de l'eau (Encadré 7.11). Au-delà de ces quelques dizaines de micromètres, les conditions sont à nouveau réductrices et entraînent la précipitation de phases solides d'uranium stables.

La dissolution radiolytique est un processus de surface qui dépend de la surface spécifique des pastilles offerte à l'eau (joints de grains, fissures, fractures...). En revanche, elle n'est pas influencée par la température. L'oxydation radiolytique pourrait être inhibée par la présence de l'hydrogène produit principalement par la corrosion des composants métalliques de l'alvéole. Cet hydrogène aurait la capacité de réduire par catalyse de surface les espèces  $\text{U}^{\text{VI}}$  formées par la dissolution radiolytique (Spahiu *et al.*, 2004).

Le mécanisme de dissolution radiolytique conduit à la dissolution totale des pastilles d'oxydes en 80 000 à 100 000 ans (en fonction du taux de combustion). En considérant de manière pénalisante qu'une fraction des actinides est labile, on obtient une dissolution totale en 50 000 ans (Figure 7.3.5).

En l'absence du mécanisme de dissolution radiolytique, les pastilles d'oxydes se dégradent par une lente dissolution en milieu réducteur (solubilisation) (Andra, 2005d ; SKB, 2004). La dissolution totale des pastilles d'oxydes nécessiterait alors au moins un million d'années. En l'absence de radiolyse, les conditions sont réductrices même au contact des pastilles d'oxydes et l'uranium IV libéré par la dissolution de l'oxyde d'uranium précipite sous forme de phases stables à proximité immédiate des colis (Andra, 2005d ; Giffaut & Coelho, 2005).

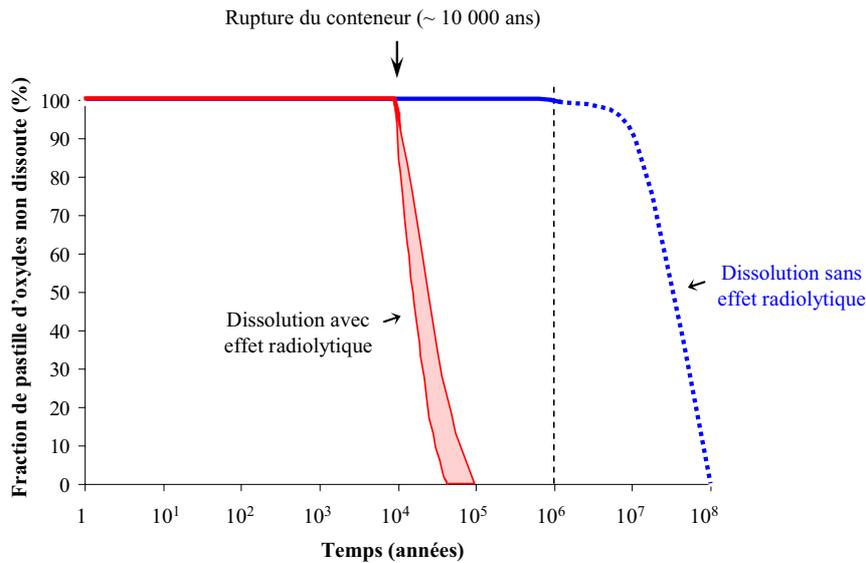


Figure 7.3.5 Représentation simplifiée de l'évolution de la dissolution des pastilles d'oxyde d'un combustible usé CUI UOX3 long dans le temps (Andra, 2005d ; Andra, 2005m)

La corrosion des autres matériaux présents dans les assemblages (aciers inoxydables, inconel et zircaloy) se produit après la rupture du conteneur et l'arrivée de l'eau. Lors de la perte d'étanchéité du conteneur, les conditions redox à l'échelle de l'alvéole sont réductrices, du fait de la chimie des eaux et de la présence d'hydrogène produit par corrosion. Par ailleurs, les composants métalliques des assemblages sont situés à une distance suffisante (plusieurs millimètres au minimum) des pastilles d'oxydes pour ne pas être affectés par les processus de radiolyse de l'eau.

De plus, lors de l'arrivée de l'eau au contact des assemblages, la température a suffisamment décreu ( $T < 50\text{ °C}$ ) (Bauer, 2005) pour que son influence sur les processus d'altération soit limitée.

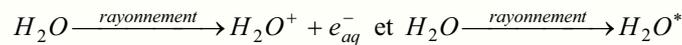
Dans ces conditions réductrices et faiblement thermiques, la corrosion des aciers inoxydables et de l'inconel est faible du fait de la formation d'une couche d'oxydes passivante ; les vitesses de corrosion sont de l'ordre  $10^{-2}\text{ }\mu\text{m.an}^{-1}$ . Dans ces mêmes conditions, la corrosion des gaines en zircaloy s'effectue avec une vitesse de l'ordre de  $10^{-3}\text{ }\mu\text{m.an}^{-1}$  (Andra, 2005d). Compte tenu des dimensions de ces différents composants, leur corrosion totale est atteinte en environ 500 ans pour les éléments en inconel, en plusieurs milliers d'années pour les éléments en acier inoxydable et une vingtaine de milliers d'années pour les gaines. Ces durées sont sensiblement identiques pour les différents combustibles usés CU1 (UOX) et CU2 (MOX), leurs géométries étant semblables.

### Encadré 7.10 La radiolyse de l'eau

La radiolyse de l'eau a pour origine l'interaction des rayonnements  $\alpha$  et  $\beta\gamma$  avec les molécules d'eau. Elle produit des radicaux libres qui réagissent rapidement pour former des espèces oxydantes et des gaz tels que l'hydrogène (Andra, 2005d ; Andra, 2005f, Tome 2).

Tout d'abord, le rayonnement déstabilise la molécule d'eau entraînant la formation de radicaux  $\text{OH}^\circ$  et  $\text{H}^\circ$  le long de sa trajectoire. Dans les zones contiguës à la trajectoire, ou « grappes », la concentration élevée en radicaux permet leur recombinaison et la formation de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , oxydant puissant, et de  $\text{H}_2$  (espèces primaires).

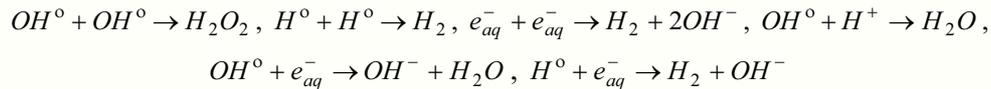
1<sup>ère</sup> étape : ionisation ou excitation de la molécule d'eau :



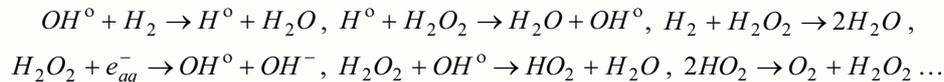
2<sup>ème</sup> étape : formation de radicaux libres :



3<sup>ème</sup> étape : recombinaison des radicaux libres :



Les différentes espèces primaires migrent hors des grappes et continuent à réagir. La probabilité pour que ces espèces réagissent entre elles diminue alors significativement tandis que les réactions avec les solutés du milieu aqueux s'intensifient :



Le bilan des espèces oxydo-réductrices produites par la radiolyse dépend de la chimie de la solution, des composés présents (acier, radionucléides sensibles au redox...), de la cinétique de formation et de consommation des espèces oxydantes et de la nature du rayonnement  $\alpha$  ou  $\beta\gamma$  (SKB, 1999). Selon la nature des solutés, actifs (nitrates, carbonates, chlorures, fer, pastille de combustibles,...) ou non, les espèces finales en solution diffèrent, mais majoritairement, il s'agit de  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  et  $\text{O}_2$ . Ces espèces sont susceptibles de se combiner entre elles, ce qui correspond essentiellement à la neutralisation des espèces oxydantes par l'hydrogène.

Dans le cas d'une radiolyse  $\alpha$ , l'aspect ponctuel du rayonnement entraîne une augmentation très localisée des teneurs en  $\text{H}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}_2$  et privilégie la formation d'espèces moléculaires. Le panache des espèces formées a une extension de quelques dizaines de micromètres autour de la source irradiante (SKB, 1999).

Par ailleurs, la radiolyse  $\beta\gamma$  en milieu désaéré entraîne principalement la formation de radicaux. Les expérimentations montrent en effet que la radiolyse  $\beta\gamma$ , en formant essentiellement des composés radicalaires qui peuvent se recombinaison, autorise l'établissement d'un état stationnaire avec destruction partielle des composés moléculaires formés alors que la radiolyse  $\alpha$  produit principalement des composés moléculaires qui ne peuvent que s'accumuler (Andra, 2005f, Tome 2). Les espèces moléculaires, tout de même formées par une irradiation  $\beta\gamma$ , sont par ailleurs consommées rapidement dans le milieu par les radicaux également produits.

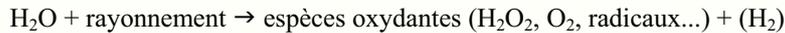
**Encadré 7.11 La dissolution radiolytique des pastilles d'oxydes  $UO_2/PuO_2$  (1/2)****Introduction**

Les mécanismes de la dissolution d'une pastille d'oxydes des combustibles usés ont été largement étudiés, en particulier au travers de nombreux programmes de recherches nationaux et internationaux tels que le programme européen SFS et le programme de recherche CEA / EDF Precci (Andra, 2005d). Ces recherches combinent l'approche expérimentale, l'étude d'analogues naturels, tels que le site d'Oklo (Gabon) (programmes européens Oklo Natural Analogue (I et II) (Del Nero *et al.*, 1999 ; Horie *et al.*, 2004 ; Salah *et al.*, 2000) et la modélisation (Andra, 2005d ; SKB, 2004).

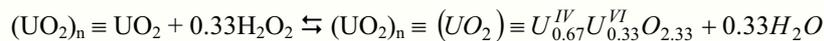
**Le processus**

La dissolution d'une pastille d'oxydes  $UO_2$  ou  $UO_2/PuO_2$  est due à la solubilisation de la pastille par une attaque locale de cette dernière par les espèces issues de la radiolyse de l'eau (dissolution radiolytique) par l'effet des rayonnements  $\alpha$  et  $\beta\gamma$  (cf. Figure ci-dessous). La dissolution radiolytique se décompose elle-même en plusieurs étapes :

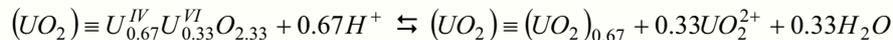
- ① la production d'espèces oxydantes par radiolyse de l'eau :



- ② les espèces oxydantes formées réagissent avec la surface de l' $UO_2$ , entraînant la formation de  $UO_{2+x}$  :



- ③ l'oxydation de la pastille d'uranium peut également conduire à la formation d' $U_3O_7$  très soluble en raison de la valence +VI de l'uranium. Par la suite, les oxydes d'uranium se dissolvent en fonction de leur solubilité dans le milieu :



L'uranium VI peut être réduit par l'hydrogène ou les autres espèces réductrices présentes pour former des phases solides d'uranium IV qui précipitent *in situ*.

Une pastille de combustible émet des rayonnements  $\alpha$  et  $\beta\gamma$ . Ces derniers diminuent rapidement et le rayonnement  $\alpha$  devient majoritaire après quelques centaines d'années. Pendant la superposition des radiolyses  $\beta\gamma$  et  $\alpha$ , les vitesses sont accrues par rapport à la seule radiolyse  $\alpha$ . La vitesse de dissolution radiolytique augmente avec le débit de dose  $\alpha$  du fait de son incidence sur la concentration des oxydants produits par la radiolyse de l'eau (Andra, 2005d). La radiolyse  $\alpha$  conduit à une augmentation de la vitesse de dissolution du combustible de plusieurs ordres de grandeur par rapport à la dissolution sans intervention de la radiolyse.

La cinétique de la dissolution radiolytique est également fortement influencée par l'hydrogène produit. Le rôle exact de ce dernier n'est pas entièrement compris aujourd'hui. Il apparaît cependant comme pouvant fortement inhiber les processus de dissolution radiolytique (Spahiu *et al.*, 2004) en imposant des conditions réductrices au contact des oxydes. Il en résulte qu'un modèle prenant en compte la dissolution radiolytique est nécessairement prudent.

### La dissolution radiolytique d'une pastille $UO_2 / PuO_2$ (2/2)

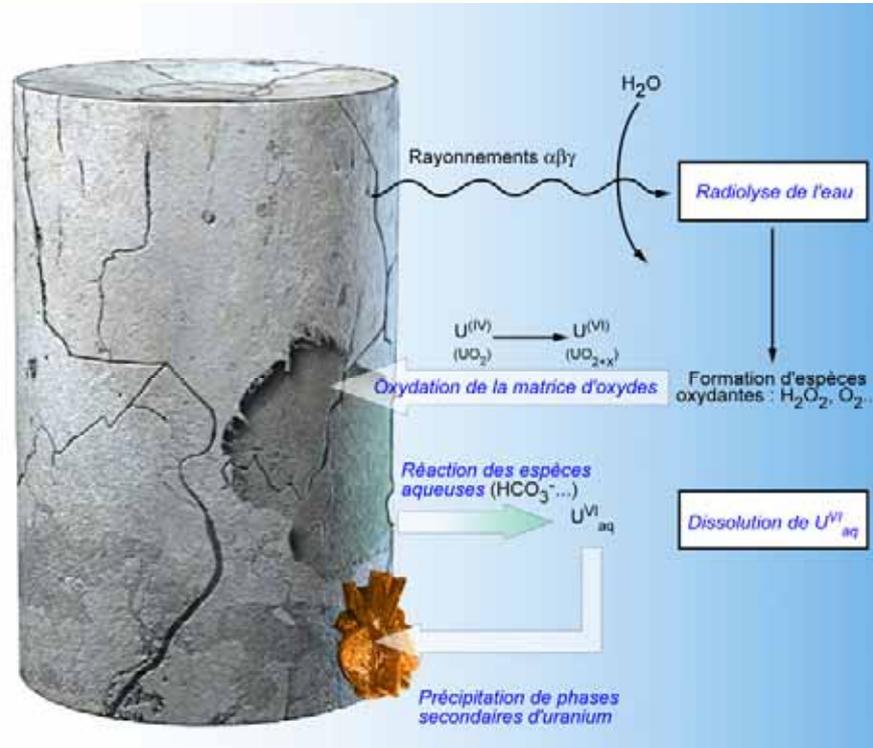


Schéma simplifié des différents processus de dissolution d'une pastille d'oxydes  $UO_2 / PuO_2$

#### 7.3.6 La perturbation alcaline en tête d'alvéole

Le bouchon en béton des alvéoles de déchets C et de combustibles usés est à l'origine d'une perturbation alcaline du noyau en argile gonflante et des argilites du Callovo-Oxfordien (Jacquot & Michau, 2005) (Figure 7.3.6). Parallèlement, le bouchon en béton subit une dégradation, principalement lors de son interaction avec les eaux issues des argilites. Ce point sera traité dans les paragraphes consacrés à l'évolution chimique des alvéoles de déchets B (cf. § 7.4.2). Le développement de la perturbation alcaline nécessite l'atteinte d'un degré de saturation du béton supérieur à 80 %. Celui-ci est atteint dans la totalité du bouchon quelques milliers d'années après la fermeture du stockage.

Les conditions hydrauliques et de transport des solutés exposées dans le chapitre 6 traitant des écoulements montrent que la diffusion reste globalement le processus dominant. Transitoirement, lors de phases de surpression hydraulique, notamment celle liée à la migration de l'hydrogène, une codominance convection-diffusion peut s'instaurer en tête d'alvéole pendant quelques milliers d'années. Néanmoins, les faibles flux d'eau mis en jeu et l'état non totalement saturé du béton au cours de cette période limitent la dégradation du béton et la propagation de la perturbation alcaline. Dès lors, celles-ci se développent principalement dans des conditions de diffusion dominante.

### 7.3.6.1 La perturbation alcaline du bouchon en argile gonflante

Dans les alvéoles de déchets C, les composants argileux et cimentaires du bouchon sont directement en contact ; la perturbation alcaline n'entre donc pas en compétition avec d'autres dégradations. Dans les alvéoles de combustibles usés, le bouchon en béton et le bouchon argileux sont également en contact. Le revêtement en acier est maintenu en place notamment au niveau du bouchon en béton et peut très localement favoriser la superposition de la perturbation alcaline à la perturbation fer / argile. Cette superposition est, de par les surfaces de contact offertes, potentiellement plus importante au droit du bouchon en béton dans les argilites.

Les expérimentations et modélisations réalisées entre autres dans le cadre des programmes européens ECOCLAY I et d'ECOCLAY II (Gaucher *et al.*, 2004 ; Savage *et al.*, 2002) montrent que la perturbation alcaline correspond à des processus d'échanges d'ions et de dissolution-précipitation dans l'argile gonflante. Elle se traduit par la formation d'une zone profondément reminéralisée au contact du béton, correspondant à la dissolution des smectites et à la précipitation de phases cimentaires et de zéolithes et d'une zone faiblement perturbée, caractérisée principalement par la transformation de la montmorillonite sodique en montmorillonite calcique (Gaucher *et al.*, 2004 ; Jacquot & Michau, 2005 ; Mosser-Ruck & Cathelineau, 2004 ; Savage *et al.*, 2002). Ces perturbations correspondent également à une hausse du pH des eaux interstitielles.

Dans le cas des alvéoles de combustibles usés, les perturbations alcaline et fer / argile sont simultanées. La phénoménologie des deux perturbations superposées n'est pas évaluée à ce jour. Néanmoins, les phases cimentaires et ferrifères étant faiblement réactives entre elles, le développement de la perturbation fer / argile ne modifie probablement pas la réactivité des argiles avec les eaux cimentaires. La perturbation alcaline est ainsi similaire à celle se développant sans perturbation fer / argile. *A contrario*, la perturbation fer / argile est probablement différente en conditions alcalines par rapport à celle en conditions argileuses et devrait montrer des extensions plus limitées compte tenu en particulier des cinétiques de corrosion des composants métalliques plus faibles en milieu basique.

La perturbation alcaline se poursuit jusqu'à la dégradation complète du bouchon en béton, soit *a minima* plusieurs centaines de milliers d'années. Les modélisations actuelles, ne prenant pas en compte l'épuisement de la source de béton (Jacquot & Michau, 2005), indiquent que l'extension de la zone fortement reminéralisée atteint environ une vingtaine de centimètres en 100 000 ans et une soixantaine de centimètres en un million d'années. Celle de la zone faiblement perturbée est d'ordre pluridécimétrique à 100 000 ans (environ 60 - 70 cm) et reste inférieure à deux mètres après un million d'années (Jacquot & Michau, 2005). L'augmentation du pH dans le bouchon d'argile gonflante étant circonscrite à la zone fortement minéralisée, les colis de déchets et de combustibles ne seraient pas affectés par cette augmentation locale du pH.

Les modifications minéralogiques du bouchon d'alvéole sont d'extension limitée de sorte que ce dernier conserve ses propriétés hydrauliques et de gonflement sur la majorité de sa longueur (> 80 %) sur le million d'années. Par ailleurs, le bouchon conserve aussi sur cette épaisseur ses propriétés de rétention.

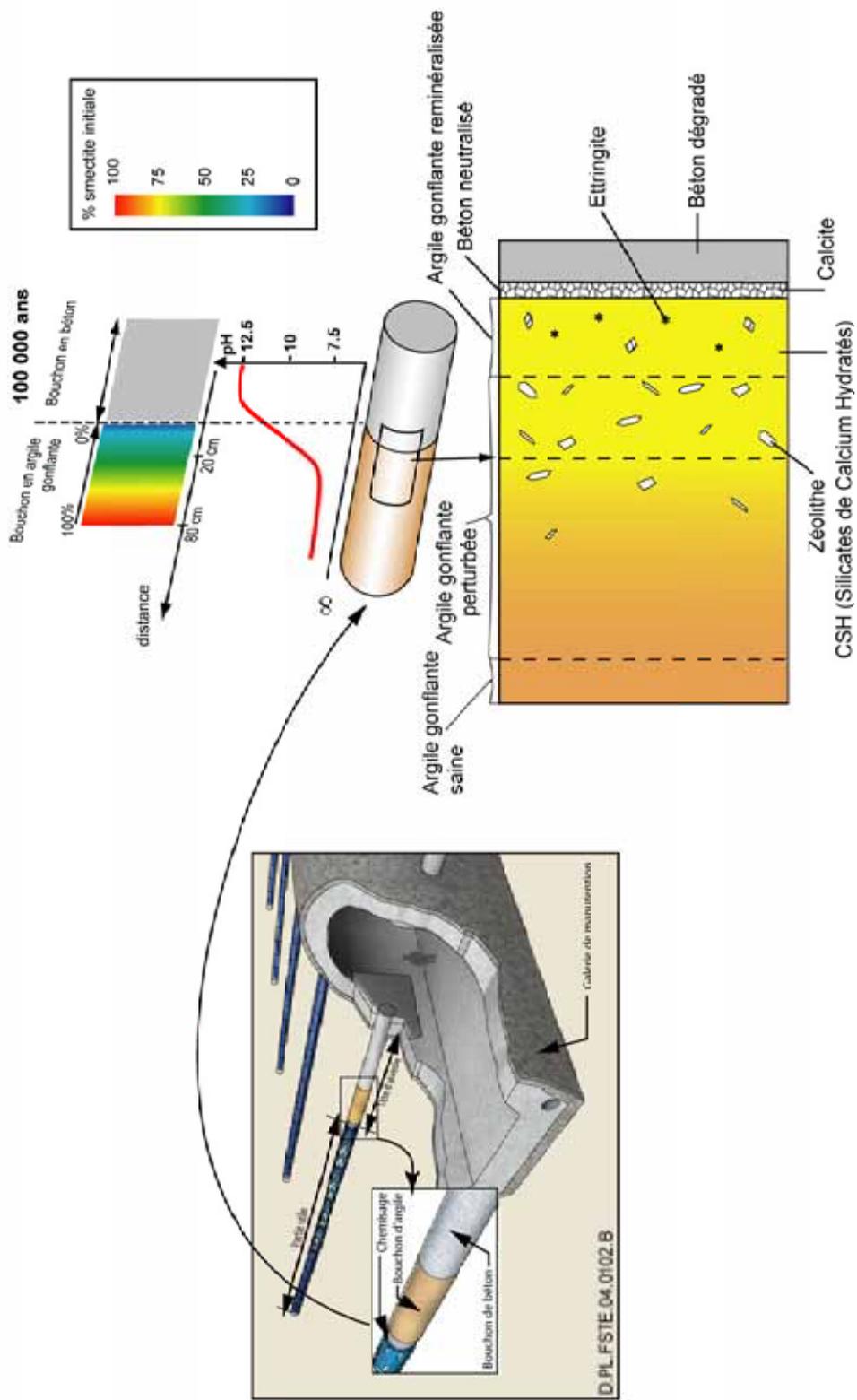


Figure 7.3.6 Schéma de la perturbation alcaline d'un bouchon d'argile gonflante d'une alvéole de déchets C, à 100 000 ans

### 7.3.6.2 La perturbation alcaline des argilites autour du bouchon en béton

La perturbation alcaline dans les argilites en champ proche débute dès la dégradation du bouchon en béton de l'alvéole et la migration du panache alcalin dans les argilites en parois. Dans le cas d'une alvéole de combustibles usés, le contact entre le béton et les argilites n'est pas direct. Le revêtement laissé en place en tête d'alvéole n'est pas perforé au niveau du bouchon en béton. Toutefois, sa corrosion est significative après quelques centaines à quelques milliers d'années, c'est-à-dire au moment où la saturation du noyau en béton est suffisante pour entraîner une perturbation alcaline dans les argilites. Ainsi, la perturbation alcaline n'est pas affectée par la présence du revêtement étanche.

Dans le cas d'une alvéole de déchets C, la progression de la perturbation alcaline (Encadré 7.12) est semblable à celle décrite pour une alvéole de déchets B (cf. § 7.4.4) avec la formation d'une zone fortement reminéralisée et d'une zone plus faiblement perturbée. Dans la zone reminéralisée, les processus de dissolution et précipitation forment une zone plus plastique et moins poreuse que les argilites saines, avec des propriétés hydrauliques proches de celles des argilites saines, en particulier une perméabilité faible. La perturbation alcaline contribue à une « cicatrisation hydraulique » significative de la zone fracturée de l'EDZ. La zone faiblement perturbée conserve des propriétés hydrauliques et mécaniques similaires à celles des argilites saines.

Dans le cas d'une alvéole de combustibles usés, la perturbation alcaline se superpose à la perturbation fer / argilites. La phénoménologie des deux perturbations superposées n'est pas précisée à ce jour. Néanmoins, elle est très probablement similaire à celle décrite pour l'argile gonflante au paragraphe précédent.

La perturbation alcaline se poursuit jusqu'à la dégradation complète du bouchon en béton, c'est-à-dire sur plusieurs centaines de milliers d'années *a minima*. Sur le million d'années, l'extension de la perturbation alcaline dans les argilites en tête des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés se limite à celle de l'EDZ initiale. Les modélisations (Jacquot & Michau, 2005 ; Michau, 2005a) indiquent que l'extension de la zone fortement reminéralisée est de l'ordre d'une dizaine de centimètres après 100 000 ans et d'une trentaine de centimètres à un million d'années et celle de la zone faiblement perturbée atteint environ une cinquantaine de centimètres après 100 000 ans et reste inférieure à trois mètres à un million d'années.

## *Encadré 7.12 La perturbation alcaline dans les argiles (argilites et argiles gonflantes)*

### **Introduction**

La perturbation alcaline des argiles par les fluides cimentaires fait l'objet de nombreux travaux en France et à l'international depuis plusieurs années, principalement pour l'étude des stockages géologiques. Ces travaux combinent, suivant une approche parallèle, les expérimentations en laboratoire jour et en laboratoire de recherche souterrain, l'étude des analogues naturels, en particulier des sites de Maqarin et de Khushaym Matruck (en Jordanie) et les modélisations (Jacquot & Michau, 2005). Ils ont été menés dans le cadre des projets européens ECOCLAY I et II réunissant des agences internationales et des laboratoires de recherche universitaires ou nationaux (ENRESA, NAGRA, PSI, SCK CEN, AB SKB, BRGM,...) ainsi que dans le cadre du groupement de recherches du CNRS / Andra (FORPRO... Andra, 2005d). Pour les roches argileuses, on bénéficie tout particulièrement des expérimentations souterraines au Mont Terri (Adler, 2001 ; Andra, 2005d). Ainsi, les principaux mécanismes réactionnels de la perturbation alcaline et des évolutions minéralogiques sont bien connus (Chermak, 1992a ; Chermak, 1992b ; De Windt *et al.*, 2004 ; Gaucher *et al.*, 2004 ; Hlavacek M., 1995 ; Jacquot & Michau, 2005 ; Mosser-Ruck & Cathelineau, 2004 ; Savage *et al.*, 2002 ; Taubald *et al.*, 2000 ; Vieillard *et al.*, 2004).

### **Le processus réactionnel**

Les matériaux cimentaires (Encadré 2.8) et les matériaux argileux (Encadré 2.6) présentent des stabilités thermodynamiques différentes. La perturbation alcaline dans les argiles au sens large (argiles gonflantes et argilites) se développe soit lors du contact avec un fluide cimentaire soit lors de la percolation par un fluide cimentaire. Ce dernier provient de la dégradation des matériaux cimentaires qui entraîne essentiellement la libération d'ions hydroxydes et de cations alcalins et alcalino-terreux. Ces éléments réagissent avec les phases argileuses soit par des processus d'échange d'ions avec les surfaces des argiles, soit par des processus de dissolution / précipitation.

L'échange d'ions dans les argiles se produit principalement pour les ions Na, Ca et Sr. Ce processus instantané contribue à la diminution du pH et des concentrations en alcalins et alcalino-terreux des fluides interstitiels des argiles et par là même à tamponner la perturbation alcaline dans ces dernières.

Les processus de dissolution / précipitation concomitants de l'échange d'ions se traduisent principalement par la dissolution des phases argileuses (smectites...) et de certains minéraux accessoires tels que le quartz et la précipitation de phases secondaires cimentaires telles que des CSH (silicates de calcium hydratés) et des CASH (alumino-silicates de calcium hydratés) ainsi que des zéolithes (De Windt *et al.*, 2004 ; Jacquot & Michau, 2005). Les phases CSH et CASH évoluent elles-mêmes vers des zéolithes avec le temps.

### **L'extension (temps – espace) et l'organisation de la perturbation alcaline**

En supposant un transfert diffusif des solutés, la perturbation alcaline progresse par fronts suivant deux zones successives, tout d'abord une zone fortement reminéralisée au contact de l'eau cimentaire ou d'un béton (disparition des minéraux argileux, précipitation de minéraux cimentaires) puis au-delà une zone faiblement perturbée (dissolution partielle des minéraux argileux). Conventionnellement, l'extension de la zone faiblement perturbée est définie par une quantité de smectites transformées supérieure à 5 % de la quantité initiale. Le pH diminue fortement dans la zone reminéralisée puis tend progressivement vers le pH initial des argilites (7,5) (Jacquot & Michau, 2005).

### **La cinétique de progression de la perturbation alcaline**

La vitesse de progression de la perturbation alcaline (*i.e.* fronts) dans les argiles dépend de leurs propriétés de diffusion. Par ailleurs, elle tend à diminuer avec le temps du fait du colmatage développé à l'interface entre les deux types de matériaux cimentaire et argileux par la formation de la zone reminéralisée.

Les modèles récents rendent compte des couplages des réactions sur la porosité et la diffusion. Les codes tels que Phreeqc ou Hightec permettent d'évaluer les ordres de grandeur de l'extension de la perturbation alcaline (Jacquot & Michau, 2005).

### 7.3.7 Les autres processus chimiques en tête des alvéoles de déchets C et de combustibles usés

Les différents matériaux constitutifs de la tête des alvéoles (noyau en argile gonflante, bouchon en béton et les composants métalliques : bouchon métallique et revêtement pour les alvéoles de combustibles usés) réagissent également entre eux et avec le milieu argileux environnant. Ainsi, les composants métalliques (revêtement, bouchon métallique) de la tête des alvéoles se corrodent. En plus de la perturbation alcaline engendrée par le bouchon en béton, le noyau en argile gonflante du bouchon interagit également avec les eaux des argilites du Callovo-Oxfordien et avec les matériaux métalliques (revêtement et bouchon métallique). De même, en plus de la perturbation alcaline, les argilites au contact du bouchon en béton interagissent avec le revêtement métallique en tête des alvéoles de combustibles usés.

On retrouve au niveau de la tête d'alvéole des processus identiques à ceux décrits pour la partie utile (cf. § 7.3.1, 7.3.2 et 7.3.3), mais avec des températures moins élevées.

On peut donc tirer des conclusions similaires : (i) le bouchon en argile gonflante se rééquilibre avec les eaux des argilites du Callovo-Oxfordien sans perturbation de sa minéralogie ; (ii) l'extension de la zone fortement reminéralisée liée à la perturbation fer / argile reste d'extension centimétrique. Dès lors, le bouchon conserve ses propriétés hydrauliques et de transport ; (iii) les interactions entre le revêtement métallique et les argilites restent limitées : la zone fortement reminéralisée liée à la perturbation reste d'extension centimétrique et la zone faiblement perturbée d'ordre pluridécimétrique.

Dans les alvéoles de combustibles usés, la corrosion du revêtement au droit du bouchon est similaire à celle décrite pour la partie utile des alvéoles. Au contact du bouchon en béton, l'alcalinité des eaux conduit à des cinétiques de corrosion plus faibles qu'en milieu argileux. Dès lors, la corrosion totale du revêtement dans cette zone ne devrait être atteinte qu'aux alentours de la dizaine de milliers d'années. On notera néanmoins que durant la phase d'exploitation, la désaturation des argilites autour de la galerie d'accès peut atteindre la partie la plus externe du revêtement. À ce niveau et de façon très transitoire peut se développer une corrosion en milieu oxydant (Crusset, 2005) (Encadré 7.3) mais dont la cinétique sera limitée par l'état non saturé des argilites. Dès la fermeture de l'alvéole, on retrouve très rapidement des conditions anoxiques.

## 7.4 L'évolution chimique des alvéoles de déchets B en postfermeture

La présence de béton au sein des alvéoles de déchets B (soutènement / revêtement, remplissage, radier, colis de stockage) conditionne leur évolution chimique, en particulier celle des colis de stockage de déchets B et des argilites en champ proche (Encadré 2.6, Encadré 2.7).

Le chapitre 6 a indiqué l'existence d'un transitoire hydraulique marqué dans les alvéoles de déchets B, lié aux dimensions de ces ouvrages, à la phase de ventilation et à la production d'hydrogène par corrosion des composants métalliques (déchet et contenants primaires des déchets). Bien que, dans le détail, des différences puissent apparaître entre les différentes alvéoles en fonction des colis de déchets qu'elles contiennent, l'histoire hydraulique des alvéoles de déchets B est marquée par une longue période au cours de laquelle les alvéoles ne sont pas totalement saturées. Le degré de saturation des bétons atteint 80 % en quelques milliers d'années, mais la saturation quasi totale ( $S > 95$  %) des alvéoles les plus productrices d'hydrogène n'est atteinte qu'au-delà de la centaine de milliers d'années. Les argilites en champ proche retrouvent un degré de saturation supérieur à 99 % après 10 000 ans. L'état de saturation des bétons et des colis primaires, les valeurs et l'organisation des flux d'eau dans et autour des alvéoles pendant cette période de resaturation déterminent l'évolution chimique des alvéoles.

Les outils de simulation actuels ne permettent pas de rendre compte des évolutions chimiques en conditions non saturées. Néanmoins, on peut considérer que la période d'état non saturé des alvéoles de déchets B devrait être caractérisée par des évolutions chimiques plus lentes et d'extension plus limitées que celles se développant dans un milieu saturé tel que celui atteint au-delà de 100 000 ans dans ces ouvrages. Cette analyse qualitative s'appuie sur les quantités d'eau mises en jeu et sur le ralentissement des processus de diffusion dans des milieux non saturés. À l'extrême, il est possible de considérer que les évolutions chimiques au cours des premiers 100 000 ans sont suffisamment restreintes pour que l'on puisse décaler le début effectif de la majorité des processus chimiques au-delà de cette période. Cela concernerait plus particulièrement la dégradation des bétons et la perturbation alcaline des argilites qui lui est associée. En revanche, d'autres processus tels que la corrosion (Encadré 7.3) ou la reprise d'eau par les boues bitumées peuvent s'initier bien avant l'atteinte d'un degré de saturation élevé. Les simulations numériques, en particulier sur la dégradation des bétons, ont été réalisées en considérant un milieu saturé. Elles ne prennent donc pas en compte cette phase d'état non saturé et fournissent des éléments temporels majorants (durée de vie des composants par exemple). Comme on le verra dans les paragraphes qui suivent, les processus de dégradation des bétons et la perturbation alcaline dans les alvéoles de déchets B s'étendent sur plusieurs centaines de milliers d'années, durée bien supérieure à celle caractérisant la phase de non-saturation (100 000 ans). Ceci relativise donc l'importance du décalage éventuel que pourrait induire la phase de non-saturation dans le déroulement des dégradations chimiques au sein des alvéoles de déchets B.

Au-delà de 100 000 ans, après l'atteinte d'un état quasi saturé dans l'alvéole et dans le stockage en général, puis d'un nouvel état d'équilibre hydraulique, l'évolution chimique est conditionnée par les flux d'eau mis en jeu et les conditions de diffusion des solutés. Les déchets B n'étant pas ou peu exothermiques, la température n'intervient que marginalement dans l'évolution chimique de ces alvéoles. De plus, la durée de la charge thermique est courte et ne concerne que la période durant laquelle les alvéoles sont fortement désaturées (cf. § 5).

Les évolutions chimiques de la partie utile et de la tête d'alvéole peuvent être considérées comme similaires. En effet, cette dernière est uniquement constituée d'un remplissage en béton. Le scellement d'alvéole de déchets B est situé dans la galerie d'accès et se comporte comme un scellement de galerie (cf. § 7.5).

La description de l'évolution hydraulique d'une alvéole de déchets B montre que sa resaturation s'organise localement de manière complexe, du fait notamment des jeux de mise en place et des macropores au sein de certains colis primaires. Après resaturation totale, la diffusion restant le mode de transport dominant, l'effet des vides sur le transport des solutés peut être négligé à l'échelle de l'alvéole. On peut donc raisonnablement admettre à ce stade que la dégradation chimique d'une alvéole de déchets B s'effectue globalement de manière isotrope depuis ses parois au contact avec les eaux des argilites et depuis son cœur (pour les alvéoles dont les colis relâchent des espèces potentiellement agressives vis-à-vis des bétons).

Dans la description de l'évolution chimique des alvéoles de déchets B, on abordera successivement et en suivant l'évolution hydraulique des alvéoles :

- le retour à des conditions redox anoxiques, puis réductrices ;
- la dégradation des composants cimentaires (soutènement / revêtement, radier et colis de stockage) du fait des eaux des argilites et des produits de dégradation de certains déchets B ;
- l'évolution chimique des colis primaires. On traitera principalement les colis de déchets de coques et embouts (colis types B4 et B5) et les colis de boues bitumées (colis types B2), qui constituent l'essentiel des inventaires radiologique et quantitatif des colis B ;
- la perturbation alcaline des argilites en champ proche des alvéoles.

#### 7.4.1 Le passage à des conditions anoxiques puis réductrices

La fermeture d'une alvéole arrête l'apport en oxygène et en CO<sub>2</sub>. L'oxygène est alors consommé, soit par la corrosion des matériaux métalliques, soit par l'oxydation de la pyrite dans les argilites désaturées en pourtour de l'alvéole, soit par l'activité bactérienne. Les conditions redox dans l'alvéole sont, au début de la resaturation, imposées essentiellement par les eaux des argilites. Le potentiel redox est imposé par le couple S<sup>II</sup> / S<sup>IV</sup> piloté par la pyrite et les teneurs en sulfates dans les eaux interstitielles ce qui conduit à des valeurs du potentiel redox proches de -200 mV (Andra, 2005k). Au sein de l'alvéole, la présence d'hydrogène et de fer métal pourrait imposer le contrôle du potentiel redox et conduirait à des conditions plus réductrices dans l'ensemble des alvéoles. Les processus de dégradation des colis de déchets sont susceptibles d'entraîner des conditions localement oxydantes, à proximité des colis de déchets. Ces processus sont détaillés ci-dessous (cf. § 7.4.3).

Après la fermeture d'une alvéole de déchets B, les eaux de resaturation percolent les argilites oxydées en parois de l'ouvrage et conduisent à modifier les équilibres minéralogiques résultant de l'oxydation des argilites au cours de la phase d'exploitation (dissolution des minéraux sulfatés en particulier). Ceci ne modifie pas significativement la composition des eaux de resaturation, déjà sulfatées (Altmann & Jacquot, 2005). La dissolution des sulfates entraîne une diminution du rapport Na / Ca des fluides de resaturation qui conduit à un échange de cations, du sodium par le calcium, en site interfoliaire dans les smectites des argilites. Ces phénomènes sont transitoires et, compte tenu des rapports eau-roche mis en jeu, la chimie des eaux en champ proche reste comparable à celle des argilites non perturbées. Ainsi, à l'échelle macroscopique, les propriétés de gonflement des argilites ne sont pas modifiées (Andra, 2005k).

#### 7.4.2 La dégradation chimique des matériaux cimentaires des alvéoles de déchets B

Les matériaux cimentaires d'une alvéole de déchets B sont soumis à un ensemble de perturbations principalement liées aux eaux issues des argilites du Callovo-Oxfordien (hydrolyse, carbonatation sous eau, attaque par les sulfates ; Encadré 7.13) mais aussi à des composés chimiques, notamment acides, relâchés par certains colis de déchets. Cela concerne principalement les colis de boues bitumées B2 et les colis contenant des composants organiques comme les colis types B5.1.

**Encadré 7.13 La réactivité sous eau des matériaux cimentaires****Introduction**

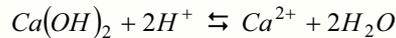
Les phénomènes de dégradation chimique des bétons sont étudiés depuis plusieurs décennies dans le domaine du génie civil (barrages, centrales,...). L'étude de la dégradation chimique des bétons dans la configuration d'un stockage en formation géologique profonde s'inscrit dans cette démarche générale, mais elle a par ailleurs fait l'objet de programmes spécifiques, notamment dans le cadre de la communauté européenne, tels que RADWASTOM 3C et 4C. L'ensemble des recherches a permis de développer des modèles de dégradation chimique des bétons, et les processus de dégradation sont aujourd'hui bien appréhendés. Les incertitudes résiduelles concernent principalement les conséquences des réactions de dégradation sur les propriétés d'écoulement d'eau et de transport des solutés. En effet, les phénomènes de dissolution et de précipitation liés à la dégradation chimique entraînent des modifications de la porosité, de la perméabilité et des coefficients de diffusion. En retour ces modifications peuvent faire varier l'extension des processus de dégradation dans le temps et l'espace (Bourbon, 2005).

**Le processus**

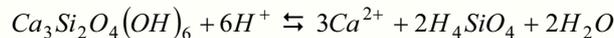
Les eaux carbonatées, faiblement alcalines et plus ou moins riches en sulfates des argilites du Callovo-Oxfordien entraînent trois réactions concomitantes de dégradation des bétons : l'hydrolyse, la carbonatation sous eau et l'attaque par les sulfates.

**L'hydrolyse : la lixiviation du béton et l'ouverture de sa porosité**

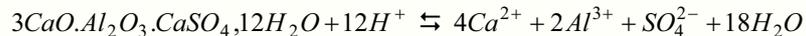
L'hydrolyse consiste en la dissolution successive des différents minéraux constituant les matériaux cimentaires (Encadré 2.8) et conduit à leur neutralisation progressive. La première étape est la dissolution des oxydes d'alcalins ( $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$ ) et d'alcalino-terreux ( $\text{MgO}$  et  $\text{CaO}$ ), avec formation de bases fortes. À l'équilibre initial, le pH des eaux cimentaires est supérieur à 13. Avec la dissolution des oxydes, le pH diminue jusqu'à une valeur de 12,5 contrôlée par la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Puis cette dernière se dissout à son tour :



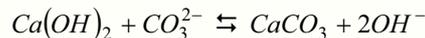
Lorsque toute la portlandite a été consommée, ce sont les CSH (silicates de calcium hydratés) (ex : afwillite  $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_4(\text{OH})_6$ ) qui sont progressivement neutralisés avec une diminution progressive du rapport calcium / silice (C / S).



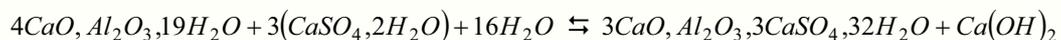
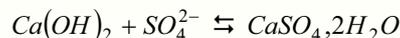
Le pH décroît de 12,5 à 10,5. Ce dernier pH est contrôlé par la tobermorite, qui est le plus stable et donc le dernier à se décalcifier. La dernière étape de l'hydrolyse correspond à la neutralisation de la brucite ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ). Les sulfo-aluminates (ex. : monosulfo-aluminate de calcium  $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaSO}_4, 12\text{H}_2\text{O}$ ) se dissolvent conjointement aux CSH :

**La carbonatation : le colmatage de la porosité**

La carbonatation sous eau est identique à la carbonatation atmosphérique décrite dans l'Encadré 7.2. Elle correspond à la dissolution de la portlandite et à la précipitation de calcite  $\text{CaCO}_3$ , ce qui conduit à une réduction de la porosité pouvant aller jusqu'à son colmatage :

**L'attaque par les sulfates : la fissuration du matériau**

L'attaque par les sulfates correspond à la formation de composés sulfatés (essentiellement de l'ettringite) à partir des aluminates. Ces composés sulfatés sont fortement expansifs ce qui entraîne une fissuration locale du matériau. La première étape correspond à la formation de gypse puis ce dernier réagit avec les aluminates de calcium pour former de l'ettringite :



### 7.4.2.1 L'hydrolyse des matériaux cimentaires

L'arrivée des eaux au contact des matériaux cimentaires amorce leur hydrolyse. Les conditions de cette hydrolyse dépendent directement des conditions hydrauliques. En effet, l'hydrolyse est pilotée par la percolation du béton par les eaux interstitielles des argilites du Callovo-Oxfordien et par diffusion des  $\text{OH}^-$  du béton vers les argilites.

Le premier processus ne devient significatif qu'après la resaturation complète des ouvrages cimentaires (soit environ 50 000 ans pour les alvéoles contenant les colis types B2 et environ 100 000 ans pour les autres alvéoles de déchets B). Pendant la période de production d'hydrogène, les matériaux cimentaires, en contact direct avec les argilites saturées, subissent une hydrolyse par interdiffusion du panache alcalin vers les argilites et des solutés argileux vers les bétons. Après resaturation, l'hydrolyse est entretenue à la fois par la percolation des eaux interstitielles des argilites du Callovo-Oxfordien dans les ouvrages des alvéoles de déchets B et par diffusion. L'hydrolyse progresse par fronts au sein de l'alvéole depuis la paroi vers le cœur (Figure 7.4.1).

Dans les deux cas, les processus d'hydrolyse sont identiques et correspondent à la dissolution successive des différents minéraux constitutifs des bétons : les oxydes d'alcalins et d'alcalino-terreux, la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) puis les CSH (silicates de calcium hydratés) (Encadré 2.8, Encadré 7.13).

Cette dissolution se décompose en quatre phases successives caractérisées par des conditions de pH et de stabilité de phases minérales différentes. Le béton est ainsi caractérisé de façon simplifiée par un état « sain » puis « altéré », « dégradé » et enfin « neutralisé » (Bourbon, 2005). Ces 4 phases sont précédées de l'état initial transitoire du béton, l'état frais :

- le ciment frais est caractérisé par la présence d'oxydes alcalins et alcalino-terreux. Le pH des solutions interstitielles est supérieur à 13. Les bases issues de l'hydratation de ces oxydes sont d'abord neutralisées par les eaux percolantes ;
- après cet état initial transitoire, le ciment est dit « sain ». Il conserve cet état tant que la totalité de la portlandite n'a pas été dissoute. Le pH de l'eau interstitielle est alors tamponné à 12,5 environ ;
- après dissolution de la portlandite, le béton altéré se dégrade par dissolution-précipitation des CSH avec un abaissement du rapport calcium / silicium (C / S) et libération d'hydroxyde de calcium. Le pH décroît de 12,5 à 10,5 environ. Cette dernière valeur correspond au pH pour lequel la tobermorite est stable ;
- la décalcification de la tobermorite correspond à l'état dégradé du ciment. Le pH reste stable à 10,5 ;
- au-delà, le ciment est considéré comme neutralisé, étape ultime de la dégradation où il est assimilé à un matériau granulaire consolidé.

Les modélisations de l'hydrolyse des bétons (Bourbon, 2005) conduisent à une extension de la dégradation, fondée sur la seule diffusion, de l'ordre de 7 cm sur 10 000 ans et, fondée sur la percolation uniquement, d'environ 30 cm sur 100 000 ans pour un béton de type CEM V. Ces modélisations ne prennent pas en compte l'effet de colmatage par la carbonatation (cf. ci-dessous).

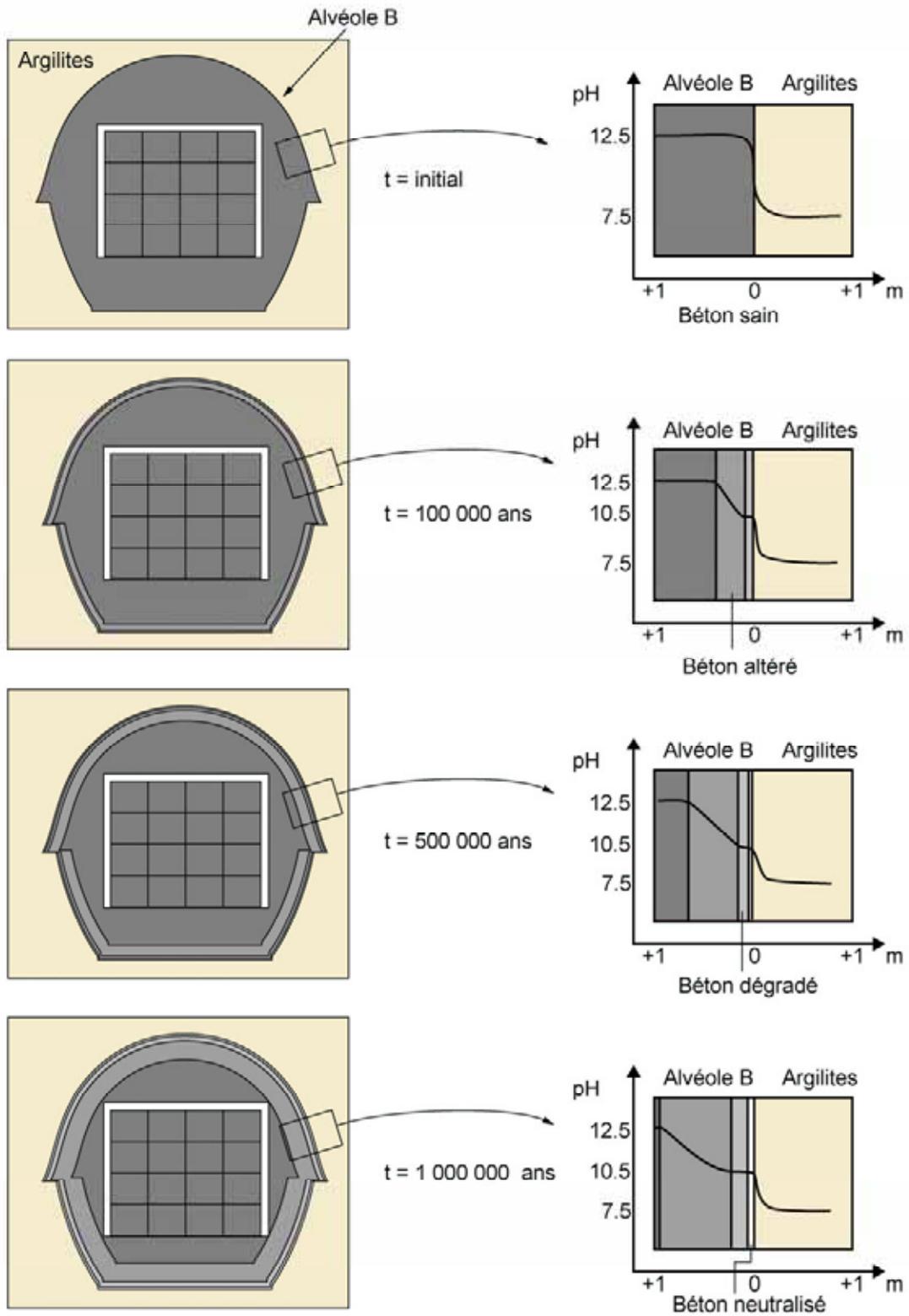


Figure 7.4.1 Schéma de la progression de la dégradation des revêtement / soutènement en béton de type CEM V d'une alvéole de déchets B (Bourbon, 2005)

Dans le cas des évaluations considérant une percolation des eaux des argilites, la vitesse de dégradation des bétons par hydrolyse dépend du flux de renouvellement des eaux dans les pores des matériaux et de la formulation des bétons (Encadré 2.8). Les conditions hydrauliques du stockage, détaillées dans le § 6, sont caractérisées par de faibles flux d'eau au sein du Callovo-Oxfordien et au sein des ouvrages. Elles conduisent à une dégradation chimique des matériaux cimentaires lente se poursuivant sur plusieurs centaines de milliers d'années. La propagation du front correspondant à l'état altéré du béton atteindrait moins d'un mètre en un million d'années pour un béton CEM V. Cela signifie que les colis de stockage resteraient dans un environnement de béton sain et ne seraient pas chimiquement dégradés sur cette période.

#### **7.4.2.2 La carbonatation sous eau**

La diffusion, puis la percolation des eaux interstitielles des argilites du Callovo-Oxfordien dans les ouvrages cimentaires d'une alvéole de déchets B conduisent également à des processus de carbonatation sous eau. Ces processus sont similaires à ceux décrits précédemment pour la carbonatation atmosphérique (cf. § 7.2.2). Ils correspondent à la formation d'une zone fortement calcifiée limitée à l'interface du béton avec les argilites et d'extension pluricentimétrique sur le million d'années (Encadré 7.13).

La cinétique de progression de la carbonatation est pilotée par les propriétés de transport diffusif du matériau cimentaire. Ainsi, la progression dans le matériau cimentaire ne se fait pas par fronts, comme pour l'hydrolyse, avec un système chimique homogène de part et d'autre de ce front, ni de façon constante dans le temps (Bourbon, 2005). La carbonatation sous eau entraîne un colmatage progressif de la porosité, ce qui induit la diminution de la perméabilité et des coefficients de diffusion du matériau. Ceux-ci deviennent significativement plus faibles que ceux du matériau sain et entraînent un ralentissement des processus d'hydrolyse en limitant fortement les échanges de part et d'autre de l'interface carbonatée. Deux zones, dont les propriétés de transfert sont modifiées, se succèdent alors depuis l'interface avec les argilites : la zone carbonatée dont la perméabilité est diminuée par rapport à celle du béton sain, et la zone hydrolysée dont la perméabilité est augmentée par rapport à celle du béton sain.

Les modélisations estiment l'extension de la zone altérée d'un béton à la fois par hydrolyse et par carbonatation sous eau à moins de 4 cm en 7 500 ans en conditions saturées.

#### **7.4.2.3 L'attaque par les sulfates des eaux des argilites**

Les matériaux cimentaires percolés par l'eau des argilites subissent également une attaque par les sulfates (Encadré 7.13). Cette attaque reste probablement un phénomène secondaire, en particulier suite au choix de la composition des bétons employés dans les ouvrages, composition adaptée aux teneurs en sulfates attendues.

Néanmoins, il est possible, au vu des quantités de sulfates apportées par les eaux des argilites (Altmann & Jacquot, 2005), qu'une attaque par les sulfates se produise à leur interface. Ce phénomène ne concernerait qu'une dizaine de centimètres de béton en 10 000 ans (Bourbon, 2005). En outre, ce phénomène n'a qu'un effet mineur sur la consommation de la portlandite qui contrôle le pH des bétons.

#### **7.4.2.4 La dégradation par les déchets**

La fermeture et la resaturation d'une alvéole de déchets B, en plus d'initier et d'entretenir la dégradation des ouvrages cimentaires, entraînent l'arrivée d'eau au contact des colis de stockage, puis des colis primaires de déchets. Les paragraphes précédents ont montré que la dégradation des bétons par les eaux des argilites restait limitée à quelques dizaines de centimètres sur le million d'années. Dans ces conditions, les eaux arrivant au contact des colis de stockage sont celles d'un béton sain et ne

présentent pas de caractère agressif, de sorte que le cœur de l'alvéole et en particulier les colis de stockage ne pourraient être dégradés que par des éléments issus des déchets eux-mêmes.

L'atteinte de la saturation quasi totale à l'intérieur des colis primaires intervient à 100 000 ans. Néanmoins, excepté pour les colis présentant une macroporosité (par exemple colis de déchets compactés), un degré de saturation des colis primaires suffisant pour initier les processus d'altération des déchets est atteint en quelques milliers d'années.

Les colis de déchets dont le contenu est susceptible de relâcher des espèces agressives pour le béton sont essentiellement les colis de boues bitumées (colis types B2). Ceux-ci relâchent des acides organiques et des sulfates (cf. § 7.4.3). Un bilan effectué sur la totalité des acides susceptibles d'être relâchés par les boues bitumées, indépendamment de toute cinétique, conduit à ne dégrader que le béton des colis de stockage. Les bétons de revêtement et de remplissage ne sont alors pas affectés (Bourbon, 2005). La cinétique de relâchement des sels sulfatés ( $10^{-4} \text{ an}^{-1}$ ) conduit à une attaque sulfatique localisée au niveau du colis de stockage qui n'affecte pas en masse l'alvéole.

#### **7.4.2.5 La dégradation des composants métalliques des colis de stockage**

Les colis de stockage des déchets B sont renforcés des fibres métalliques en acier inoxydable. Leur dégradation s'amorce quelques centaines à quelques milliers d'années après la fermeture des alvéoles, puisque, pendant le transitoire de production d'hydrogène, le degré de saturation du béton des colis de stockage est de l'ordre de 80 % ce qui rend possible les processus de corrosion. Dans ces conditions, la vitesse de corrosion est inférieure à  $10^{-2} \mu\text{m.an}^{-1}$  (Andra, 2005d).

Sur cette base, les fibres de renforcement, d'un diamètre moyen de 0,5 mm, se corrodent totalement en 25 000 ans environ. La corrosion des fibres entraîne une perte de tenue mécanique, en particulier la résistance à la traction, des colis de stockage susceptible d'entraîner leur rupture (cf. § 8).

#### **7.4.3 La dégradation des colis de déchets B (Andra, 2005d)**

Au même titre que les alvéoles de déchets B, les colis de stockage évoluent dans un environnement qui se resature progressivement. Cependant, l'organisation de la resaturation des alvéoles dépend de la nature des déchets qu'elles contiennent et des quantités d'hydrogène produites. La dégradation des colis de déchets B est intimement pilotée par l'organisation de la resaturation dans les alvéoles (cf. § 6) et les conditions d'humidité relative.

Des différences apparaissent en effet en fonction de la nature des déchets. Dans les alvéoles contenant des déchets métalliques compactés, mais non cimentés (colis types B1, B5 et B6), l'arrivée de l'eau liquide au contact des colis primaires ne se produit qu'après environ une centaine de milliers d'années du fait de la production d'hydrogène par corrosion et de la présence d'une macroporosité. Néanmoins, pendant cette période, les conditions d'humidité relative sont suffisantes pour permettre la corrosion des déchets métalliques peu de temps après la fermeture des alvéoles.

Dans le cas d'une alvéole contenant des déchets métalliques compactés et/ou cimentés (colis types B3 et B4), un degré de saturation suffisant pour l'apparition d'eau liquide au contact des déchets est atteint en quelques centaines d'années (cf. § 6). Dans le cas des colis de boues bitumées (colis types B2), la reprise d'eau est initiée dès que l'humidité relative est supérieure à 70 % soit très peu de temps après la fermeture de l'alvéole (cf. § 6).

La dégradation des colis de déchets est intimement liée aux conditions physico-chimiques à leur contact. En particulier, après la resaturation des alvéoles, les déchets B se dégradent dans une eau tamponnée par les matériaux cimentaires des alvéoles. En outre, les processus d'irradiation et la radiolyse de l'eau sont susceptibles de modifier localement les conditions redox au contact des colis.

La dégradation des déchets est ainsi influencée par le caractère irradiant ou non des déchets et par le caractère oxydoréducteur des composés libérés (ex. : les nitrates dans les colis types B2).

Lors de la dégradation des déchets, et quelle que soit leur nature, les conditions thermiques sont modérées ( $< 30\text{ °C}$ ) (cf. § 5). Elles n'interviennent pas sur les processus de dégradation des colis.

#### 7.4.3.1 Les processus radiolytiques dans les colis de déchets B

Les processus de radiolyse de l'eau apparaissent lorsque deux conditions sont remplies : d'une part, les conditions de saturation doivent permettre la présence d'eau libre et d'autre part les colis doivent avoir un caractère irradiant.

Dans le cas de colis irradiants, tant que les conditions hydriques au sein des colis restent fortement désaturées, la radiolyse de l'eau (Encadré 7.10) est négligeable. Néanmoins, au cours de la période où ces colis sont désaturés, la condensation d'eau au sein des colis primaires non étanches ne peut pas être totalement exclue, mais reste marginale.

La radiolyse de l'eau au contact des colis primaires dépend directement de la valeur des débits de dose. Ils deviennent significatifs au-delà de  $1\text{ Gy.h}^{-1}$ . Or, les débits de dose diminuent depuis la fabrication des colis (Figure 7.4.2), pendant leur mise en place dans le stockage, au cours de la période de postfermeture (Andra, 2005a, Situations Zb1x\_1/2, Zb2\_1/2 et Zb1h\_1/2 ; Andra, 2005d ; Andra, 2005e) et deviennent inférieurs à  $1\text{ Gy.h}^{-1}$  après environ 500 ans, quelle que soit la nature des déchets. Ils sont donc essentiellement non irradiants lors de l'arrivée de l'eau à leur contact. Dans l'éventualité où un petit nombre de colis resterait irradiant, ce caractère ne perdurerait que pendant quelques dizaines d'années à une centaine d'années, et serait donc sans conséquence.

Dans ces conditions, la radiolyse de l'eau est processus négligeable et sans conséquence sur l'évolution chimique des déchets.

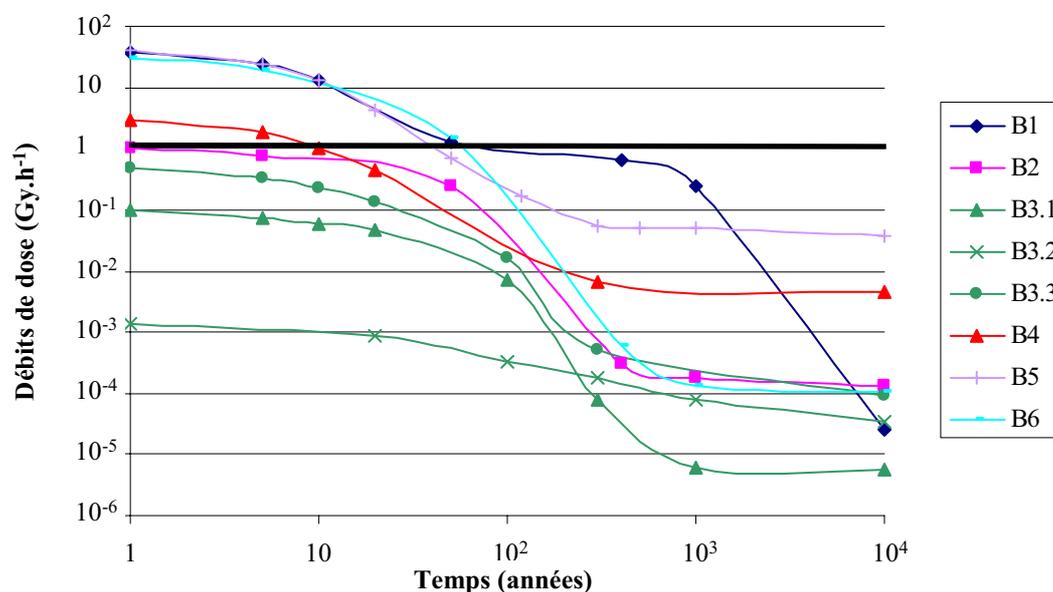


Figure 7.4.2 Évolution des débits de dose ( $\text{Gy.h}^{-1}$ ) au contact des colis primaires de déchets B (évaluation sur le côté du colis) (Andra, 2005a)

### 7.4.3.2 La dégradation des coques et embouts (colis types B4 et B5)

Les colis de coques et embouts sont essentiellement constitués par des aciers inoxydables (et inconel) et du zircaloy. Après la fermeture de l'alvéole et pendant le transitoire oxydant, les conditions désaturées des alvéoles limitent fortement, comme pendant la période d'exploitation (cf. § 7.2.5), la corrosion de ces déchets métalliques. Très rapidement, les conditions redox deviennent anoxiques.

Avec la resaturation et pendant le transitoire de production d'hydrogène, les déchets B4 et B5 amorcent leur dégradation : soit au contact d'eau libre pour les colis de déchets B4, soit par formation d'un film d'eau en surface pour les colis de déchets B5.

En effet, les colis de déchets B5, simplement compactés, possèdent des vides et des jeux importants. Pendant l'épisode de production d'hydrogène, l'hygrométrie dans ces jeux augmente d'environ 50 % à environ 90 % après quelques dizaines d'années. Les processus de corrosion sont ainsi pilotés par la formation d'un film d'eau au contact du métal. En revanche, les colis de déchets B4 sont cimentés, ce qui conduit, pendant le transitoire de production d'hydrogène, à des degrés de saturation du béton de remplissage des colis primaires de l'ordre de 80 % permettant la corrosion des déchets métalliques. Dans les deux cas, les colis de déchets amorcent leur dégradation peu de temps après la fermeture des alvéoles.

Les cinétiques de corrosion des déchets métalliques des colis B4 et B5 sont cependant comparables, du fait des conditions anoxiques atteintes en quelques dizaines d'années au maximum dans toutes les alvéoles de déchets B.

La corrosion des aciers inoxydables et de l'inconel s'effectue principalement par corrosion du métal et dissolution de l'oxyde passivant. Les eaux cimentaires au contact des colis cimentés ou qui atteignent les colis de déchets après resaturation sont des eaux à pH élevé (~ 12,5). Dans ces conditions de pH, la vitesse de corrosion est inférieure à  $10^{-2} \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$  (Andra, 2005d). Pendant le transitoire de resaturation, les cinétiques de corrosion des déchets compactés sont plus faibles, mais restent du même ordre de grandeur. Les cinétiques de corrosion ne pourraient augmenter qu'avec la diminution du pH (vers 10), liée à la dégradation des ouvrages cimentaires. Cependant, ces pH ne sont atteints que pour un béton dégradé (Bourbon, 2005) ce qui ne se produirait, au cœur des alvéoles, que bien au-delà de la durée nécessaire à la corrosion complète des déchets en acier inoxydable.

Les chlorures des eaux interstitielles des argilites du Callovo-Oxfordien ne modifient pas les cinétiques de corrosion dans les conditions anoxiques atteintes rapidement au sein des alvéoles (Andra, 2005f, Tome 3). Le développement de conditions redox localement oxydantes au contact des colis peut être envisageable avant 500 ans (Figure 10.6.3), durée maximale du caractère irradiant des colis de déchets. Dans ces conditions, les cinétiques de corrosion pourraient être plus rapides (de l'ordre de quelques  $0,1 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ ) en présence des chlorures. Néanmoins, l'arrivée de chlorures venant des eaux du Callovo-Oxfordien n'est pas envisageable sur cette durée et de telles cinétiques sont très improbables. Enfin, sur 500 ans, l'épaisseur corrodée serait négligeable.

La dégradation du zircaloy (et de l'alliage M5) se produit également par corrosion du métal avec formation d'oxyde de zirconium (ou zircone) puis dissolution de ce dernier. La cinétique de corrosion de l'alliage M5 est semblable à celle du zircaloy. Les cinétiques de corrosion en conditions alcalines saturées restent très faibles, de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $2\cdot 10^{-3} \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$  (Andra, 2005d). Pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment, un éventuel transitoire oxydant au contact des déchets est sans impact.

La corrosion complète des déchets métalliques des alvéoles de déchets B dépend de la géométrie et de l'épaisseur des déchets. Ces dernières varient en fonction des différents colis types. Pour les déchets B4 ou B5, la durée de la corrosion des déchets en acier inoxydable est de l'ordre de 70 000 ans, celle

des déchets en inconel d'environ 15 000 ans et celle des déchets en zircaloy d'environ une centaine de milliers d'années (Andra, 2005d).

#### 7.4.3.3 La dégradation des colis de boues bitumées (colis types B2)

Après la fermeture des alvéoles et pendant le court transitoire oxydant, la dégradation de la matrice bitume par oxydation sous irradiation se poursuit (cf. § 7.1.3), jusqu'à consommation complète de l'oxygène. La radio-oxydation du bitume n'affecte qu'une faible épaisseur du colis, d'ordre centimétrique, quels que soient les colis de boues bitumées. Les sels ne sont pas affectés par cette oxydation (Andra, 2005d).

Au cours de la resaturation des alvéoles et du transitoire de production d'hydrogène, la radiolyse interne de la matrice organique se poursuit avec la production d'hydrogène de la même façon que pendant l'exploitation des alvéoles (cf. § 7.1.3). Le gonflement lié à la production d'hydrogène (cf. § 7.2.5) tend à diminuer du fait d'une part de la baisse de l'intensité de la radiolyse avec la décroissance radioactive et d'autre part de la migration des bulles d'hydrogène formées et de leur évacuation. Il passe ainsi par un maximum, se stabilise aux environs de 5 % en volume de l'enrobé (soit environ 10 litres de gaz emmagasiné), puis décroît lentement, après une centaine d'années environ. Les bulles de gaz disparaissent après quelques milliers d'années. La présence de sels de cobalt dans certains enrobés (ST2 et ST3) permet de consommer quelques centaines de litres d'hydrogène ce qui reste faible comparé à la production cumulée, de l'ordre de 10 m<sup>3</sup> par colis après 10<sup>5</sup> ans, ceci quelle que soit la famille de colis.

Le transitoire de resaturation se poursuit pendant environ une cinquantaine de milliers d'années (cf. § 6). Au début de cette période, les conditions d'hygrométrie dans les jeux des alvéoles de déchets de types B2 évoluent d'environ 50 % à environ 90 % en quelques dizaines d'années. À ces taux d'humidité relative, la dégradation de la matrice bitume des déchets de colis B2 s'amorce. En effet, la reprise d'eau par le bitume s'initie pour des humidités relatives supérieures à 70 %.

La dégradation des boues bitumées au contact de l'eau liquide est caractérisée par la dissolution des sels minéraux qu'elle enrobe (par exemple pour les colis ST3 : essentiellement 1/3 de sels solubles (~ 85 % de NaNO<sub>3</sub> et ~ 15 % de NaSO<sub>4</sub>) et 2/3 de sels insolubles dont environ 80 % de BaSO<sub>4</sub>) et par la libération de composés organiques (Figure 7.4.4) (Encadré 7.14).

La dégradation des boues bitumées en solution aqueuse correspond d'abord à l'adsorption de l'eau à la surface de la matrice bitume. Puis, le front de pénétration de l'eau dans la matrice bitume diffuse peu à peu à l'intérieur de la matrice bitume et conduit à la solubilisation d'abord des sels solubles puis des sels insolubles. Une fois solubilisés, ces sels diffusent en sens inverse jusqu'à la surface de l'enrobé (Encadré 7.14).

La durée de dégradation des boues bitumées est intimement liée à la vitesse de reprise d'eau par la matrice bitume. Elle est au moins égale à la durée de libération des sels solubles. Les modélisations actuelles de la dégradation des boues bitumées estiment le durée nécessaire à une reprise théorique d'eau complète de l'ordre d'un million d'années. Concernant les radionucléides, une évaluation robuste et enveloppe conduit à une durée de relâchement des sels de l'ordre de 10 000 ans (Figure 7.4.3) (Encadré 7.14).

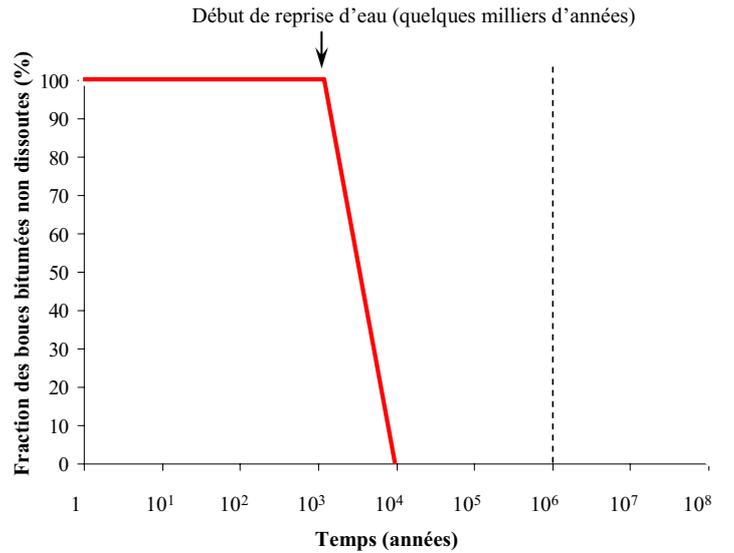
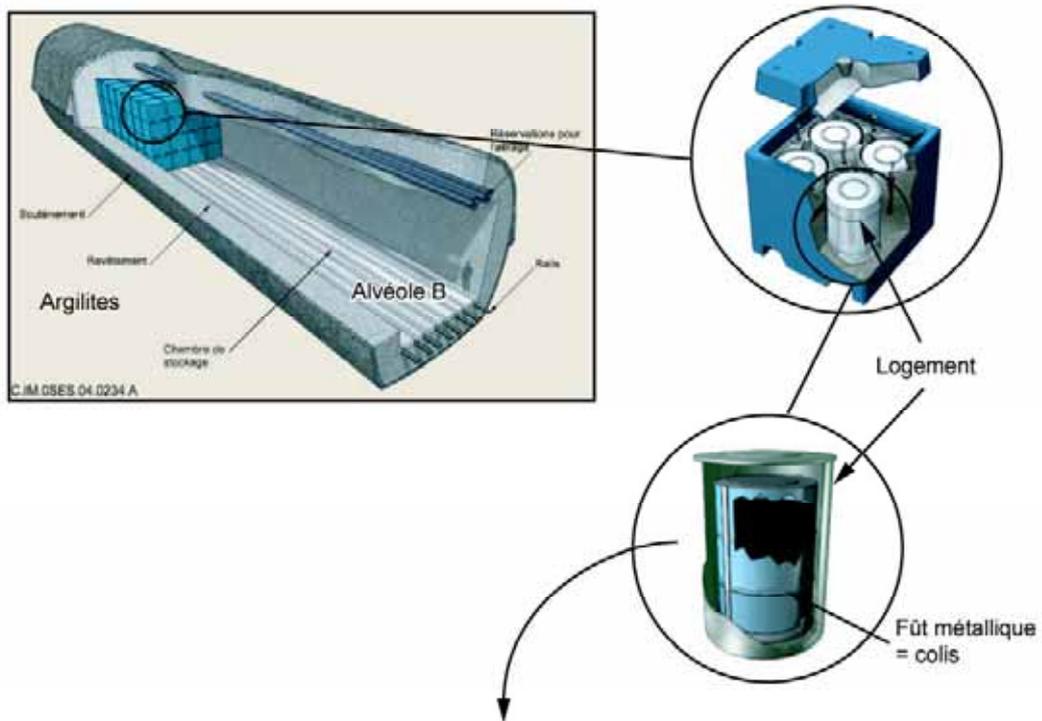


Figure 7.4.3 Représentation simplifiée de l'évolution de la dégradation des boues bitumées dans le temps (Andra, 2005d)

Cette durée de dégradation est semblable pour l'ensemble des colis de boues bitumées à l'exception de ceux contenant moins de 2 % de sels. Pour ces colis, l'extrapolation des données expérimentales disponibles conduit à une cinétique de relâchement similaire à la cinétique enveloppe retenue pour les autres colis de déchets, correspondant à une dissolution totale en 10 000 ans.

Ces évaluations ne sont pas significativement modifiées par une évolution de la géométrie du colis due à la corrosion du colis primaire. En effet, le fluage des boues bitumées est peu probable tant que l'enveloppe métallique du colis primaire est intègre, c'est-à-dire pendant plusieurs milliers d'années après la mise en place du colis. Après corrosion, il est possible qu'il y ait déformation de l'enrobé. Cependant, le contact entre le bitume et un milieu à faible porosité comme les matériaux de remplissage du colis de stockage devrait confiner le bitume dans le colis de stockage.

En ce qui concerne la dégradation de la matrice bitume, des évaluations maximisantes conduisent à estimer que moins de 20 % du bitume pourrait être solubilisé sur le million d'années (Andra, 2005k). L'influence des produits organiques ainsi libérés sera traitée dans le paragraphe consacré au transfert des radionucléides dans les alvéoles de déchets B (cf. § 10).



Dégradation des colis de type B2 après corrosion des fûts métalliques

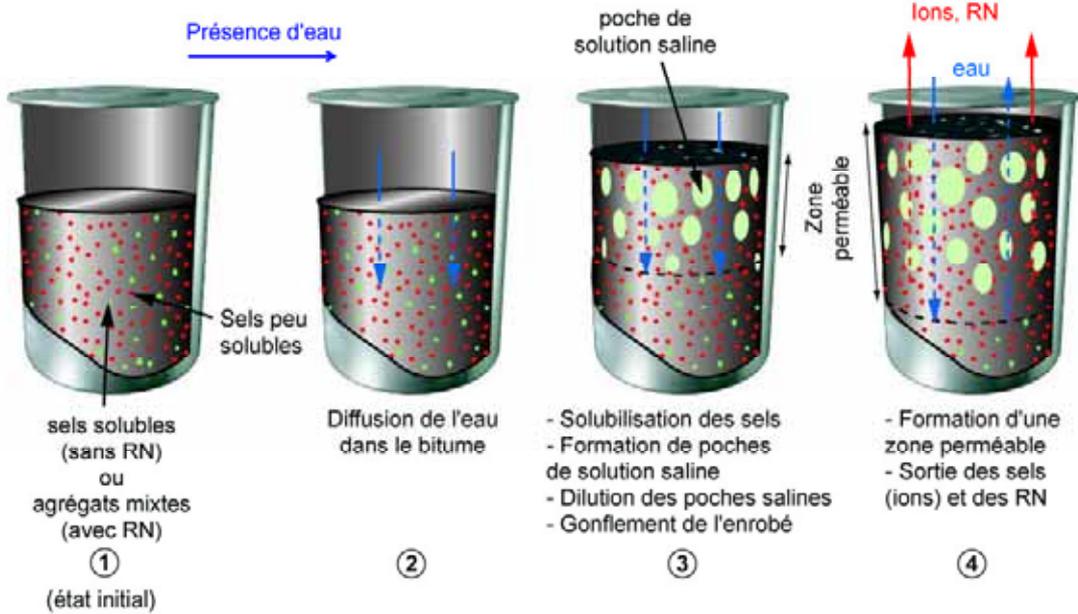


Figure 7.4.4 Schéma des différentes étapes de la dégradation d'un colis de boues bitumées

### Encadré 7.14 *La dégradation aqueuse des boues bitumées (colis types B2)*

#### **Introduction**

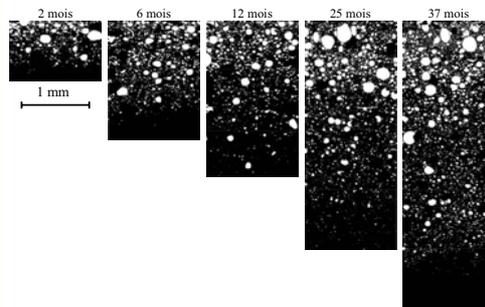
L'utilisation d'une matrice bitume pour enrober les déchets remonte au milieu des années 60. Afin d'expliciter les processus d'évolution de la matrice dans les conditions d'un stockage, de nombreuses recherches ont été développées (Nagra, 2002b ; ONDRAF, 2001a ; ONDRAF, 2001b ; RWMC, 2002) de manière à comprendre les processus régissant le comportement à long terme du bitume (Andra, 2005d ; Bernat, 1994 ; Brodersen, 1999 ; Camaro *et al.*, 1999 ; Conrad *et al.*, 1983 ; Dejonghe, 1999 ; Gwinner, 2004 ; Libert, 1999 ; Sercombe *et al.*, 2004 ; Van Iseghem & Sneyers, 1981). Ces recherches ont abouti à la compréhension des mécanismes de dégradation des boues bitumées.

#### **Le processus et son extension**

Les boues bitumées sont constituées d'une matrice bitume enrobant des sels minéraux issus du traitement par coprécipitation sélective des effluents de faible et moyenne activité à vie longue : il s'agit de sels dits « solubles » majoritairement constitués de  $\text{NaNO}_3$  et de sels faiblement solubles et dits « insolubles », dont le principal est  $\text{BaSO}_4$  (Andra, 2005d).

La dégradation de l'enrobé se produit sous eau, mais également en milieu atmosphérique lorsque l'humidité relative est supérieure à celle imposée par une solution saline de  $\text{NaNO}_3$ , le sel le plus abondant (74 %). Les processus de dégradation sont alors identiques. Les premières étapes de la dégradation des boues bitumées en solution aqueuse se caractérisent tout d'abord par l'adsorption de l'eau à la surface de la matrice bitume et sa saturation. Puis, le front de pénétration de l'eau dans l'enrobé diffuse peu à peu à l'intérieur de la matrice bitumée et conduit à la solubilisation des sels solubles et insolubles (Figure 7.4.4). Les poches de solution saline ainsi formées continuent à reprendre de l'eau (dilution) jusqu'à ce que l'activité de l'eau y soit égale à celle du milieu extérieur. Ceci entraîne une déformation locale du bitume, qui modifie alors la barrière diffusionnelle formée par le bitume et crée une zone perméable favorisant la migration par diffusion des sels.

Le processus de diffusion observé sur échantillon est généralement Fickien, quelle que soit la nature des sels. Des incertitudes persistent quant à la cinétique de relâchement des sels, qui dépend de nombreux facteurs : la composition chimique de l'eau au contact du bitume, l'activité de la solution, la quantité de sels dans le colis de déchets, les conditions de transport dans les alvéoles, la nature du bitume et le gonflement du bitume.



*Image par microscopie électronique binarisée d'enrobés ST3 0,5N lixiviés pendant 2, 6, 12, 25 et 37 mois par de l'eau pure (Andra, 2005d)*

La matrice bitume se dégrade également et entraîne la libération de composés organiques (acides formique et acétique,...). La quantité et la nature des espèces organiques disponibles dans la matrice bitume et leur solubilité dépendent de l'état d'oxydation du bitume et de la composition de la solution au contact (Andra, 2005d ; Bourbon, 2005).

La présence de micro-organismes (Andra, 2005d ; Nagra, 2003c) intervient également dans ces processus. En effet, les enrobés représentent potentiellement une source d'éléments nutritifs. Cependant, le bitume reste difficilement biodégradable et seulement 0,3 % en masse peuvent être consommés par les micro-organismes en conditions anaérobies (Libert, 1999). La biodégradation du bitume conduit à la production de gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ), à la consommation d'hydrogène et à la libération de composés complexants. Elle n'affecte pas la libération des sels de manière significative (Andra, 2005d).

#### 7.4.3.4 La dégradation des autres colis de déchets B

Les autres matériaux constituant les déchets B sont composés principalement de métaux et de composés organiques. Ces déchets ne forment qu'une faible part de l'inventaire total des déchets B (cf. § 2.3.4). Dans tous les cas, les déchets amorcent leur dégradation peu de temps après la fermeture des alvéoles.

Dans le cas des déchets métalliques, les évaluations et les comportements présentés dans les paragraphes précédents sont applicables. Seules les durées de corrosion diffèrent, du fait des géométries spécifiques des déchets (Andra, 2005d). Ainsi, pour les colis types B1, la durée de la corrosion des déchets en acier inoxydable est d'un peu plus de 20 000 ans et celle des déchets en inconel d'environ 200 000 ans. Quels que soient les déchets, les composants en zircaloy se corrodent en une centaine de milliers d'années environ.

La corrosion des aciers non ou faiblement alliés se produit en milieu partiellement saturé ou en milieu cimentaire avec une cinétique de l'ordre de  $0,1$  à  $1 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ , (Andra, 2005f, Tome 3 ; Guillaume *et al.*, 2003), (Encadré 7.3). Ces cinétiques restent semblables après la saturation des alvéoles. Ni la température dans les alvéoles, inférieure à  $30^\circ\text{C}$  dans les alvéoles B1 et B3, ni les teneurs en chlorures venant des eaux interstitielles des argilites du Callovo-Oxfordien ne modifient ces valeurs. Comme indiqué précédemment, l'éventualité d'un transitoire oxydant lié à la radiolyse n'aurait pas d'incidence sur les vitesses de corrosion. Ainsi, les déchets en acier non alliés sont totalement consommés après quelques dizaines de milliers d'années.

Les autres déchets métalliques en quantités plus faibles (alliage magnésien, cuivre, aluminium,...) se corrodent également. Les cinétiques de corrosion sont variables en fonction de leur composition. Les évaluations actuelles indiquent une vitesse de corrosion importante pour les déchets magnésiens ( $\sim 1 \text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$ , (Talandier, 2005)). Cette très forte réactivité nécessite néanmoins une importante disponibilité en eau pour permettre à la corrosion de se développer. Ils ne se dégradent ainsi que lorsque la resaturation du colis est complète et leur corrosion est alors rapide, de l'ordre de quelques années dès la resaturation des alvéoles. En ce qui concerne le cuivre, en milieu réducteur, il est thermodynamiquement stable. La présence de complexants (ions chlorures, sulfures...) et la corrosion par piqûre pourraient néanmoins conduire à sa destabilisation (Andra, 2005f, Tome 3). À titre conservatif, on retient une altération immédiate de l'ensemble de ces déchets (alliage magnésium, cuivre, aluminium,...).

Par ailleurs, un certain nombre de colis de déchets B (colis types B3.1.2, B3.1.3, B5.1,...), hors colis de boues bitumées, contiennent divers composés organiques tels que des polymères (PVC, polyuréthane, Viton...), de la cellulose, des résines,..., (Encadré 10.8). Dans les conditions cimentaires des alvéoles de déchets B, ces composés organiques se décomposent sous l'effet des eaux cimentaires et par radiolyse. Sont ainsi formés de l'éthylène glycol et de l'acide phtalique par le PVC ; des amines, des alcools, des oléfines,..., par le polyuréthane ; des polymères fluorés par le Viton ; des acides iso-sacchariniques et des acides carboxyliques (acétique, formiques,...) par la cellulose ; des oxalates, des sulfates et des amines par les résines (Andra, 2005d). La dégradation de la cellulose est un processus lent dans les conditions cimentaires des alvéoles (Encadré 10.8).

#### 7.4.4 La perturbation alcaline des argilites en champ proche des alvéoles de déchets B

De même que pour les bouchons des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés (cf. § 7.3.6), la dégradation des matériaux cimentaires des alvéoles de déchets B par les eaux du Callovo-Oxfordien, au cours et après la resaturation des alvéoles, entraîne la migration d'un panache alcalin vers les argilites (Jacquot & Michau, 2005) (Encadré 7.12).

La perturbation alcaline dans les argilites correspond à la formation d'un front perturbé qui diffuse à partir de la paroi des alvéoles de déchets B (Figure 7.4.5) vers les argilites du Callovo-Oxfordien

saines en passant par l'EDZ. La progression de la perturbation alcaline sur un million d'années reste circonscrite à celle de l'EDZ initiale au pourtour des alvéoles de déchets B. En effet, les modélisations actuelles de la perturbation alcaline (Jacquot & Michau, 2005) montrent que l'extension de la zone fortement reminéralisée évolue d'environ une dizaine de centimètres à 100 000 ans jusqu'à environ une trentaine de centimètres à un million d'années. L'extension de la zone perturbée progresse d'environ une cinquantaine de centimètres après 100 000 ans jusqu'à moins de trois mètres à un million d'années (Jacquot & Michau, 2005).

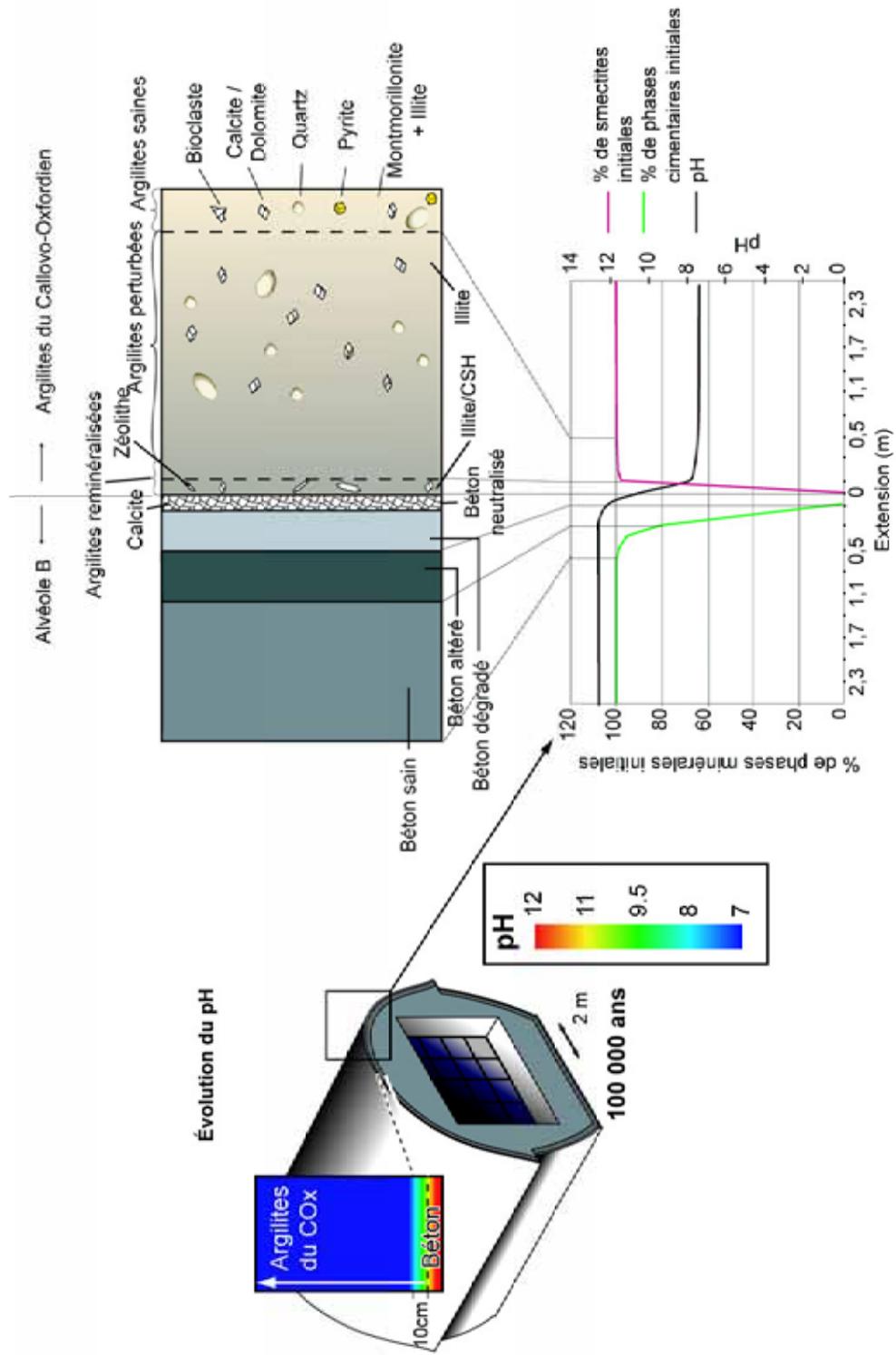


Figure 7.4.5 Schéma de la perturbation alcaline des argillites autour des alvéoles de déchets B et de la dégradation du béton de soutènement / revêtement, à 100 000 ans (Jacquot & Dimier, 2005)

## 7.5 L'évolution chimique des scellements de galerie et de puits en postfermeture

La mise en place des scellements de galerie correspond à la fermeture progressive des galeries d'accès et de liaison des alvéoles de déchets B, de déchets C et de combustibles usés. Les scellements mis en place alors que le stockage est encore en exploitation ne sont influencés, durant cette période, qu'au niveau des massifs d'appui en béton en contact avec les galeries encore ouvertes. Ces massifs subissent une légère carbonatation. Le reste du scellement commence à se resaturer. Ainsi, pendant la période d'exploitation, les scellements de galeries évoluent très peu.

Au cours de leur resaturation, les scellements (noyau et saignées en argile gonflante) se mettent en équilibre chimique avec les eaux des argilites du Callovo-Oxfordien. De même que pour les noyaux en argile gonflante des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés, cette mise à l'équilibre ne modifie pas les propriétés initiales de l'argile gonflante. Les températures peu élevées au niveau des scellements (cf. § 5) ne permettent pas le développement de l'illitisation.

Dans le même temps, les matériaux cimentaires des scellements de galerie (revêtements, radier et massifs d'appui, Figure 2.4.12) et des scellements de puits (revêtements et massifs de confinement, Figure 2.4.14) se dégradent sous l'action de l'eau des argilites du Callovo-Oxfordien. L'évolution chimique de ces matériaux cimentaires est semblable à celle décrite ci-dessus pour les matériaux cimentaires des alvéoles de déchets B (cf. § 7.4.2). Ils subissent des processus de dégradation sous l'action de la percolation des eaux interstitielles des argilites du Callovo-Oxfordien (hydrolyse, carbonatation sous eau, attaque par les sulfates, cf. § 7.4.2, Encadré 7.13). Leur dégradation se poursuit pendant plusieurs centaines de milliers d'années (Bourbon, 2005).

Cette dégradation entraîne le développement d'une perturbation alcaline dans le noyau en argile gonflante au contact des massifs d'appui et des revêtements ainsi que dans les saignées à proximité des revêtements et des radiers non déposés. Les noyaux en argile gonflante des scellements de galerie et de puits ne sont pas en contact direct avec des composants métalliques, les cintres étant inclus dans le béton de revêtement. Ils ne subissent donc pas de perturbation fer / argile.

Les argilites au contact des massifs d'appui et de confinement, des revêtements et des radiers subissent également une perturbation alcaline.

Les composants métalliques, utilisés uniquement sous forme de cintres dans les scellements de galerie, subissent quant à eux une corrosion en milieu cimentaire.

### 7.5.1 La perturbation alcaline des noyaux de scellement et des saignées par les composants en béton

La dégradation des massifs de confinement des scellements de puits, des massifs d'appui, des revêtements et du radier en béton au niveau des scellements de galeries est identique à celle des ouvrages cimentaires des alvéoles de déchets B (cf. ci-dessous § 7.4.2). Elle entraîne la diffusion d'un panache alcalin dans les matériaux argileux au contact et le développement d'une perturbation alcaline (Jacquot & Michau, 2005) (Figure 7.3.6). Dans les scellements de puits et de galeries, les composants argileux et cimentaires sont directement en contact. Ainsi, la perturbation alcaline n'entre pas en compétition avec d'autres dégradations. Il est à noter que le revêtement cimentaire est déposé au droit du noyau argileux des scellements de puits et que la perturbation alcaline ne se développe donc qu'au contact des massifs d'appui et de confinement.

Au contact des massifs d'appui et des revêtements, la perturbation alcaline dans le noyau en argile gonflante est de nature similaire à celle décrite ci-dessus pour les bouchons des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés (cf. § 7.3.6).

La perturbation alcaline se poursuit jusqu'à la dégradation complète des revêtements, des radiers et des massifs d'appui, soit au-delà de plusieurs centaines de milliers d'années *a minima*. Les géométries spécifiques des différents ouvrages conduisent à des extensions différentes de la perturbation alcaline. Au contact des massifs d'appui, l'extension de la perturbation est semblable à celle décrite ci-dessus pour les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés (cf. § 7.3.6) : entre 100 000 ans et un million d'années, l'extension de la zone fortement reminéralisée varie entre une vingtaine et une soixantaine de centimètres et celle de la zone faiblement perturbée entre environ 60 - 70 cm et moins de deux mètres. Au contact des revêtements et des radiers, la perturbation totale est plus limitée, elle se propage d'une distance pluridécimétrique à 100 000 ans à une distance d'ordre métrique à 500 000 ans (Jacquot & Michau, 2005).

Au niveau des saignées (Figure 7.5.1), la perturbation est moins marquée du fait du retrait du béton de revêtement et du radier sur une distance de 50 cm autour de la saignée. Ainsi, la zone fortement reminéralisée n'atteint pas la saignée. La perturbation alcaline se caractérise surtout par une augmentation du pH jusqu'à 10 environ et par des processus d'échange d'ions qui conduisent à la transformation quasi totale de la smectite sodique de la saignée en smectite calcique sur le million d'années. Cependant, cette modification minéralogique n'altère pas notablement les propriétés de gonflement de l'argile gonflante au niveau de la saignée. De plus, le noyau argileux conserve ses propriétés initiales sur la majorité de son épaisseur ce qui ne modifie pas ses propriétés de gonflement. Ainsi, le rôle hydraulique du scellement est conservé.

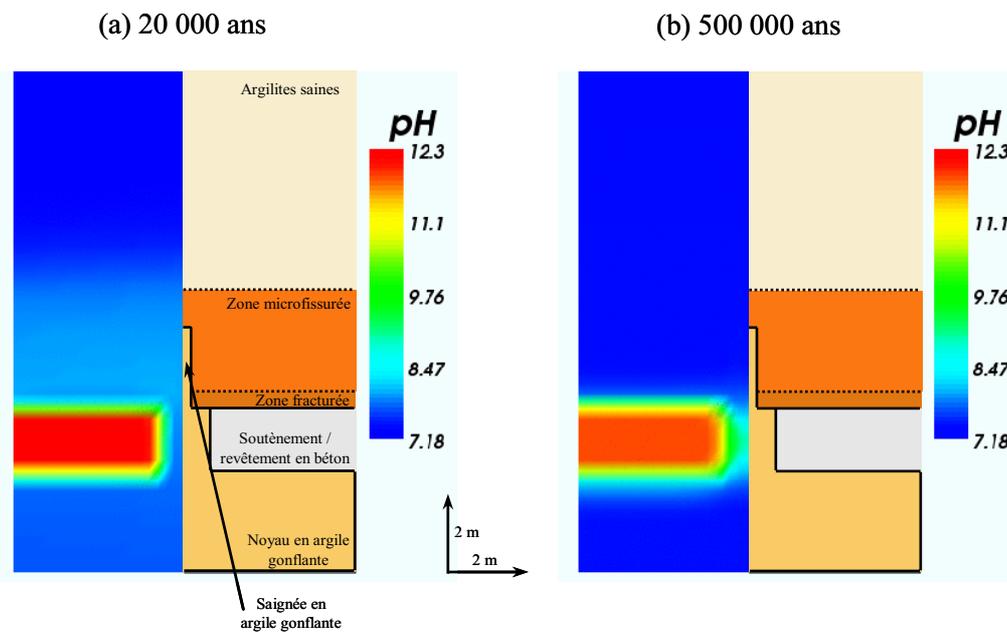


Figure 7.5.1 Représentation de la perturbation alcaline d'un scellement de galerie autour de la saignée : champ de pH à 20 000 ans (a) et à 500 000 ans (b) (Jacquot & Michau, 2005)

Dans le même temps, la dégradation chimique du massif d'appui en béton est un processus lent. Le massif d'appui conserve des capacités significatives de tenue mécanique, assurant un confinement mécanique du scellement (cf. § 8).

### 7.5.2 La perturbation alcaline des argilites en champ proche des scellements de galerie et de puits

La progression de la perturbation alcaline (Encadré 7.12) est semblable à celle décrite pour les alvéoles de déchets B (cf. § 7.4.4). Dans la zone reminéralisée, les propriétés hydrauliques sont proches de celles des argilites saines, avec en particulier une perméabilité faible. La perturbation alcaline contribue à une « cicatrisation hydraulique » significative de la zone fracturée de l'EDZ. La zone faiblement perturbée, dont les phases minérales sont peu altérées, conserve des propriétés hydrauliques, mécaniques et de rétention similaires à celles des argilites saines.

La perturbation alcaline se poursuit jusqu'à la dégradation complète des composants cimentaires, c'est-à-dire sur plusieurs centaines de milliers d'années *a minima*. En parois des massifs d'appui, l'extension maximale sur un million d'années de la perturbation est semblable à celle évaluée pour les alvéoles de déchets B : 30 cm environ pour la zone fortement reminéralisée et moins de trois mètres pour la zone faiblement perturbée. Au contact du revêtement, l'extension de la perturbation est moindre. Elle est au maximum d'ordre métrique à 500 000 ans (Jacquot & Michau, 2005).

### 7.5.3 La corrosion des composants métalliques des scellements de galerie et de puits

Les cintres métalliques présents dans les portions de revêtement maintenu en place se corrodent en milieu cimentaire comme les composants métalliques de même nature au sein des alvéoles de déchets B.

Durant le court transitoire oxydant (quelques dizaines d'années au maximum, Andra, 2005k), la présence de chlorures est susceptible de conduire à des cinétiques de corrosion de l'ordre de  $10 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ . Néanmoins, le transitoire oxydant étant de courte durée, les chlorures n'ont qu'un effet limité sur la corrosion des cintres.

Dès que les conditions deviennent anoxiques, puis réductrices, la corrosion dépend de l'évolution chimique des bétons sous l'action des eaux faiblement alcalines du Callovo-Oxfordien. En milieu cimentaire sain, les vitesses de corrosion sont d'environ  $0,1 - 1 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ . Comme souligné dans le § 7.4.2, la dégradation chimique des bétons de revêtement couvre une période de plusieurs centaines de milliers d'années *a minima*. Dès lors, la corrosion des cintres s'effectue principalement en milieu cimentaire sain à faiblement dégradé. Ceci conduit à des durées de corrosion d'au moins plusieurs milliers d'années.

## 7.6 L'évolution chimique des galeries et des puits en postfermeture

L'évolution chimique des galeries et des puits en postfermeture correspond essentiellement à la dégradation de leurs composants cimentaires (revêtement, radier, massif d'appui et massif de confinement) et à la perturbation alcaline développée sur les argilites du Callovo-Oxfordien en champ proche et sur les remblais.

### 7.6.1 La dégradation chimique des composants cimentaires des puits

D'une manière générale, l'évolution des composants cimentaires est semblable à celle décrite ci-dessus pour les composants cimentaires des alvéoles de déchets B (cf. § 7.4.2) (Figure 7.4.1).

Dans les puits, la dégradation du revêtement cimentaire au contact des marnes du Kimméridgien est lente du fait des faibles flux d'eau (cf. § 6) et s'étend sur plusieurs dizaines à centaines de milliers d'années (Bourbon, 2005).

Au niveau des Calcaires du Barrois et de l'Oxfordien carbonaté, les flux d'eau sont plus importants ce qui conduit à une dégradation des bétons plus rapide. Ainsi, le béton situé à l'extérieur des viroles est soumis à des flux d'eau issus des Calcaires du Barrois de l'ordre du  $\text{m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ . Au regard de la masse de béton (de l'ordre de quelques  $\text{m}^3$  au maximum), le revêtement externe serait entièrement dégradé après quelques centaines d'années. Les matériaux cimentaires placés en face interne des viroles sont percolés par les eaux pluviales ayant traversé les remblais. Leur dégradation est plus lente que celle des bétons en face externe des viroles mais n'est pas évaluée aujourd'hui. La dégradation complète des bétons de revêtement situés en contact avec l'Oxfordien carbonaté est également rapide, et s'effectue probablement en quelques milliers d'années.

De manière similaire, les massifs d'appui du scellement de séparation des niveaux poreux de l'Oxfordien carbonaté (Hp) se dégradent progressivement, en fonction des flux d'eau qui les traversent. Cette dégradation pourrait s'étendre sur une durée de l'ordre du millier d'années, avec des conséquences mécaniques limitées.

Les matériaux cimentaires percolés par l'eau des argilites, des marnes ou des calcaires de l'Oxfordien subissent également une attaque par les sulfates. Cette attaque reste un phénomène mineur, en particulier par le choix de la composition des bétons, résistante aux teneurs en sulfates rencontrées.

### 7.6.2 La perturbation alcaline dans le milieu géologique en champ proche des puits

De même que pour les scellements de galerie (cf. § 7.5.2), la dégradation des matériaux cimentaires des scellements et des revêtements des puits par les eaux du Callovo-Oxfordien et des encaissants supérieurs entraîne la migration du panache alcalin vers les formations situées au droit des ouvrages en béton (Jacquot & Michau, 2005).

Pour ce qui est des argilites, on se référera au paragraphe traitant des alvéoles de déchets B. Les propriétés hydrauliques et la composition minéralogique des marnes du Kimméridgien étant proches de celles des argilites du Callovo-Oxfordien (cf. § 3.3.2.3), la progression de la perturbation alcaline est probablement similaire et reste d'extension d'ordre métrique. La perturbation alcaline est donc sans effet sur les propriétés hydrauliques de cette formation.

Au niveau de l'Oxfordien carbonaté et des Calcaires du Barrois, l'extension de la perturbation alcaline n'est pas évaluée. Néanmoins, dans ces formations carbonatées, il est très probable que le panache alcalin soit rapidement tamponné par la dissolution de la calcite. Au niveau des aquifères, les flux d'eau importants mis en jeu devraient rapidement diluer les effets de la perturbation.

### 7.6.3 La perturbation alcaline des remblais de galeries et de puits en postfermeture

La fermeture des galeries et des puits du stockage comprend leur remblayage par un matériau à base d'argilites excavées puis remaniées (concassage, compactage). Ces argilites excavées et placées en verses pendant l'exploitation du stockage y subissent une oxydation dont les effets sont similaires à ceux évoqués pour les argilites désaturées en paroi des ouvrages ventilés (Andra, 20051).

Les remblais sont amenés à saturation par une eau cimentaire issue de la percolation des eaux des argilites à travers les bétons de structure. Les remblais sont mis en place à l'état non saturé avec un degré de saturation qui devrait être de l'ordre de 70 %. Par conséquent, les volumes d'eau nécessaires à l'atteinte de la saturation représentent 30 % environ de l'espace poral du remblai. Ce volume d'eau correspondant est faible comparé au volume des argilites du remblai, de sorte que l'eau cimentaire de saturation est rapidement tamponnée par ces dernières. La perturbation alcaline associée à la resaturation est ainsi très limitée.

Après l'atteinte de la saturation quasi totale ( $S > 90\%$  à 100 000 ans), se développe une perturbation alcaline liée à la dégradation des revêtements et du radier. Par analogie avec les argilites du Callovo-

Oxfordien, qui constituent l'essentiel du remblai, l'extension de la zone fortement reminéralisée devrait être d'ordre métrique au maximum à un million d'années.

### **7.7 L'évolution chimique des argilites du Callovo-Oxfordien en champ lointain**

Les interactions physico-chimiques entre les argilites du Callovo-Oxfordien et les matériaux du stockage (perturbation alcaline, perturbation fer/argilites, perturbation oxydante) sont des phénomènes d'interface dont les extensions sont circonscrites à l'EDZ initiale.

La seule perturbation pouvant éventuellement avoir des conséquences chimiques (chimie des eaux et des minéraux) et affectant en grand la couche du Callovo-Oxfordien est liée à la charge thermique au droit des zones de stockage de déchets C et des zones de stockage de combustibles usés (Bauer, 2005) (Figure 5.3.1). Il a été montré qu'en champ proche l'élévation de température au voisinage des alvéoles de déchets exothermiques n'aurait pas de conséquences minéralogiques (cf. § 7.3.2.1).

Au droit de ces zones de stockage, les profils thermiques dans le Callovo-Oxfordien montrent une décroissance rapide de la température à quelques mètres du stockage. Au-delà de ces quelques mètres, la température ne dépasse pas 60 °C. Au toit du Callovo-Oxfordien, elle est au maximum de 35 °C vers 1 000 ans et redescend à moins de 30 °C aux environs de 10 000 ans. Il faut entre 50 000 et 100 000 ans pour revenir à la température géothermale (Figure 5.3.1).

Les couples temps-température correspondant à l'évolution thermique de la couche ne sont pas de nature à modifier la minéralogie des argilites en champ lointain comme en champ proche. La chimie du fluide interstitiel évolue également peu (Altmann & Jacquot, 2005 ; Cathelineau & Mosser, 1998).

### **7.8 L'évolution chimique des formations encaissantes (Dogger et Oxfordien carbonaté)**

Sur le plan chimique, l'influence du stockage sur les formations encaissantes est minime. Elle n'intervient qu'au cours des quelques premières dizaines de milliers d'années au travers d'une élévation de température modérée (< 15 °C, Figure 5.3.1) et uniquement à la verticale des zones de stockage de déchets C et des zones de stockage de combustibles usés. À 100 000 ans, la température des encaissants est de nouveau la température géothermale initiale.

L'intensité et la durée de ce transitoire thermique ont un effet négligeable sur les propriétés des encaissants. En effet, les encaissants sont principalement formés par des carbonates peu sensibles à une telle élévation de température (Buschaert & Giffaut, 2005).

## 7.9 Synthèse sur l'évolution chimique du stockage et de son environnement géologique

### 7.9.1 Une composante importante de l'évolution phénoménologique du stockage

Les chapitres sur les évolutions thermique et hydraulique du stockage et de son environnement géologique ont défini le cadre dans lequel est décrite l'évolution chimique (Figure 7.9.1). Ensemble, ces composantes de l'évolution phénoménologique du stockage définissent le cadre de l'évolution mécanique du stockage (cf. § 8). *In fine*, elles déterminent le relâchement, puis le transfert des radionucléides dans et hors du stockage dans le temps (cf. § 10).

- Le comportement mécanique des composants du stockage est en partie déterminé par leur évolution chimique, à l'exemple de la corrosion des métaux qui entraîne une perte progressive de la tenue mécanique et de l'étanchéité des conteneurs des déchets C et des combustibles usés. La dégradation chimique des bétons par les eaux du Callovo-Oxfordien, en modifiant la cimentation et la porosité du fait des processus de dissolution et de précipitation, influe sur leurs propriétés mécaniques.
- Le relâchement des radionucléides par les colis de déchets résulte pour l'essentiel des processus chimiques, à l'exemple de la dissolution aqueuse de la matrice vitreuse.
- La solubilité et la rétention des radionucléides sont fonction des environnements chimiques qu'ils rencontrent une fois qu'ils sont relâchés. En association avec les conditions de transport en solution, ils déterminent l'immobilisation totale de la majorité des radionucléides ou, pour certains, leur mobilité dans le stockage, puis éventuellement leur transfert dans la couche du Callovo-Oxfordien, et enfin dans les encaissants.

### 7.9.2 Une évolution chimique lente et affectant principalement le stockage et le Callovo-Oxfordien en champ très proche

Les flux d'eau mis en jeu dans le stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien au cours de l'évolution hydraulique du stockage sont faibles. La diffusion reste globalement le mode de transport dominant des solutés dans et autour du stockage. La couche du Callovo-Oxfordien présente des caractéristiques chimiques qui contribuent à limiter toute perturbation chimique :

- l'augmentation de pH, due à la perturbation alcaline et la progression du panache alcalin, est limitée par la capacité d'échange cationique des argiles du Callovo-Oxfordien,
- la perturbation oxydante, liée à l'oxygène de la ventilation pendant l'exploitation du stockage, est tamponnée par la dissolution des carbonates,
- le potentiel réducteur du Callovo-Oxfordien est imposé par la présence de pyrite et de matière organique.

Par ailleurs, les périodes thermiques significatives des zones de stockage des déchets C et des zones de stockage des combustibles usés (et *pro parte* de la zone de déchets B, mais dans une moindre mesure car ces déchets sont peu ou non exothermiques) sont courtes, de l'ordre de quelques milliers d'années, à l'échelle du million d'années *a minima* de l'évolution phénoménologique du stockage. Les températures atteintes dans le stockage (et par conséquent dans la couche du Callovo-Oxfordien) ne dépassent pas 90 °C de par les dispositions conceptuelles retenues. En champ lointain, dans la couche du Callovo-Oxfordien, la période thermique est plus longue, quelques dizaines de milliers d'années, mais les températures atteintes sont plus faibles (< 60 °C) que celles atteintes dans le stockage.

L'ensemble de ces caractéristiques concourt à ce que (i) la couche du Callovo-Oxfordien ne soit que peu perturbée par le stockage, (ii) l'évolution chimique soit globalement circonscrite au stockage et (iii) les processus chimiques mis en jeu soient lents (de quelques milliers d'années à quelques centaines de milliers d'années *a minima* pour la plupart).

Ainsi, les perturbations chimiques dans la couche du Callovo-Oxfordien, liées aux interactions avec les matériaux du stockage, en particulier les bétons, ne se développent qu'en champ très proche du stockage, sur une distance de 2 à 3 m au maximum (zone perturbée) faible en comparaison de l'épaisseur minimale de 60 mètres du Callovo-Oxfordien entre le stockage et les encaissants.

Les propriétés chimiques de la couche du Callovo-Oxfordien dans son ensemble restent donc inchangées. En particulier, la chimie des eaux interstitielles reste identique à celle initiale. Le stockage n'induit pas non plus d'effet chimique sur les formations encaissantes, compte tenu notamment de leur éloignement et de la capacité du Callovo-Oxfordien à limiter rapidement la progression de ces perturbations.

### 7.9.3 Un ensemble limité de processus majeurs

Globalement, l'évolution chimique du stockage et de son environnement géologique est marquée par un nombre limité de processus.

- a. La dégradation des composants du stockage à base de bétons. Il s'agit en particulier des bétons des alvéoles de déchets B (soutènement / revêtement et colis de stockage).
- b. La perturbation alcaline créée par les composants en béton sur les argilites et sur les composants du stockage à base d'argile gonflante, avec lesquels ils sont en contact. Cela concerne en particulier les ouvrages hydrauliques du stockage : les bouchons des alvéoles de stockage et les scellements de galeries et de puits.
- c. La corrosion des composants métalliques. Elle concerne tout particulièrement les conteneurs des déchets C et des combustibles usés, mais aussi des déchets, comme les gaines et les éléments de structure des assemblages de combustibles usés.
- d. La perturbation fer / argile et fer / argilites au contact avec les composants métalliques. C'est principalement le cas de la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés ou celui des argilites avec le chemisage et le revêtement métallique des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés.
- e. La dissolution de la matrice vitreuse des déchets C.
- f. La dissolution des pastilles d'oxydes des combustibles usés.

À cela s'ajoute, les processus redox du stockage, notamment après la fermeture des ouvrages, en particulier le passage de conditions oxydantes pendant l'exploitation du stockage à des conditions anoxiques, puis réductrices après fermeture du stockage. Ces processus conditionnent la nature des réactions de corrosion des composants métalliques, et la mobilité de nombreux radionucléides.

#### 7.9.3.1 La dégradation des bétons : un processus sur plusieurs centaines de milliers d'années

De par leur capacité tampon chimique et les conditions d'écoulement et de transfert des solutés imposés par la couche du Callovo-Oxfordien, la dégradation chimique des bétons du stockage s'inscrit sur une échelle de plusieurs centaines de milliers d'années *a minima*. Ainsi, pour les alvéoles de déchets B, il y a persistance d'un environnement chimique de béton sain autour et au sein des colis de déchets B. Cette lente dégradation chimique des bétons conduit *de facto* à une lente évolution de leurs propriétés mécaniques en grand.

### 7.9.3.2 La perturbation alcaline : un processus d'interface

La perturbation alcaline se caractérise par deux zones minéralogiques : une zone fortement reminéralisée par les eaux cimentaires et une zone faiblement perturbée. Sur le million d'années, l'extension de la zone fortement reminéralisée est pluridécimétrique au maximum (60 - 70 cm), celle de la zone faiblement perturbée plurimétrique (2 à 3 mètres).

Pour les argilites, l'extension de la perturbation alcaline reste donc circonscrite à celle de l'EDZ initiale. Les processus de dissolution et précipitation mis en jeu devraient contribuer à la cicatrisation de l'EDZ. Il est probable que la zone fortement reminéralisée corresponde à une zone plastique avec des propriétés hydrauliques proches de celles des argilites saines. En outre, au regard des espèces minérales formées (zéolithes...), il est aussi probable que cette zone ait des propriétés élevées de rétention des radionucléides.

Les bouchons des alvéoles de stockage de déchets C et de combustibles usés, ainsi que les scellements ont des dimensions plurimétriques à pluridécimétriques. De fait, l'extension de la perturbation alcaline apparaît limitée à l'échelle de ces ouvrages. En particulier, l'extension totale de la perturbation alcaline n'atteint pas les colis de déchets et de combustibles. Si les propriétés de gonflement de la zone fortement reminéralisée sont (très) faibles, la masse d'argile gonflante non affectée permet de maintenir en grand les performances hydrauliques de ces ouvrages. Plus particulièrement, les dispositions de conception retenues au niveau des saignées des scellements de galeries (dépose du revêtement autour des saignées) évitent que les saignées ne soient incluses dans la zone fortement reminéralisée.

### 7.9.3.3 La stabilité des composants du stockage à base d'argile gonflante

Les composants du stockage à base d'argile gonflante restent peu affectés en masse par des processus chimiques. Ainsi, les interactions chimiques de la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés avec le fer du revêtement, du chemisage et du conteneurage sont localisées au contact même avec ces composants. La perturbation fer / argile se traduit par l'apparition d'une zone fortement reminéralisée (chloritisée) dont l'extension correspond à moins de 15 % de l'épaisseur totale de la barrière ouvragée. Au-delà de cette zone, l'argile gonflante est peu affectée. Ainsi, la masse de la barrière ouvragée s'équilibre chimiquement avec les eaux des argilites et reste stable dans le temps, en particulier lors de la charge thermique. Par conséquent, en grand, les propriétés hydrauliques, de gonflement et de rétention de la barrière ouvragée ne sont pas modifiées dans le temps. Il en va de même pour les bouchons des alvéoles de stockage et les scellements.

### 7.9.3.4 La corrosion des conteneurages de déchets C et de combustibles usés : un processus sur au moins quelques milliers d'années

Les cinétiques de corrosion des composants métalliques des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés (chemisage, revêtement, (sur)conteneur) sont faibles, de l'ordre de quelques micromètres par an au maximum, en conditions anoxiques. Elles conduisent ainsi à des durées d'étanchéité des conteneurages de plusieurs milliers d'années *a minima*, correspondant aux spécifications requises. On peut toutefois estimer des durées moins conservatives sur des bases phénoménologiques, 15 000 ans pour le surconteneur de déchets C et 30 000 ans pour les conteneurs de combustibles usés.

### 7.9.3.5 Le relâchement des radionucléides : des processus lents

- **Les colis de déchets B**

C'est dans un environnement cimentaire sain et pérenne que se développe la dégradation des colis primaires de déchets B. Cela conduit à des durées de dégradation d'au moins une dizaine de milliers d'années (cas des colis types de boues bitumées B2), de plusieurs dizaines de milliers d'années à une centaine de milliers d'années (cas des colis types de déchets compactés ou cimentés, B4 et B5). Corrélativement, le relâchement des radionucléides s'inscrit sur ces échelles de temps. De plus, les radionucléides relâchés rencontreront un environnement cimentaire faiblement perturbé par rapport à l'état initial des bétons au sein des alvéoles de stockage.

- **La dissolution de la matrice vitreuse des déchets C et des pastilles d'oxydes des assemblages de combustibles usés**

La dissolution de la matrice vitreuse des déchets C s'inscrit sur quelques milliers d'années pour les verres C0 et plusieurs centaines de milliers d'années pour les verres C1, C2, C3 et C4 après la perte d'étanchéité des surconteneurs.

La dissolution des pastilles d'oxydes de combustibles usés s'inscrit sur une échelle de temps de quelques dizaines de milliers d'années à environ 100 000 ans après la perte d'étanchéité des conteneurs, en considérant le processus de dissolution radiolytique. L'absence d'effet radiolytique conduirait à une échelle de temps de la dissolution d'au moins le million d'années.

### 7.9.4 Éléments phénoménologiques importants pour la réversibilité

L'évaluation de la réversibilité est menée par rapport aux états chimiques des composants du stockage. On rappellera dans un premier temps les principaux résultats vis-à-vis de la réversibilité, puis on traitera l'analyse des conséquences potentielles d'une exploitation pluriséculaire.

#### 7.9.4.1 État du stockage à l'issue de la période séculaire conventionnelle de référence d'exploitation du stockage

À l'issue de la période séculaire d'exploitation (au moment de la fermeture), les processus chimiques sont encore limités. C'est le cas au sein des alvéoles de stockage des déchets C et des alvéoles de stockage des combustibles usés : elles sont proches de la saturation totale, mais les vitesses de corrosion sont faibles (quelques micromètres par an au maximum) de sorte que les épaisseurs de corrosion sont de quelques millimètres. Ainsi, plus particulièrement, la faible corrosion des chemisages pendant cette période conduit au maintien de leur résistance mécanique et donc à leur étanchéité de sorte que les colis sont dans un environnement « sec » et ne sont pas affectés par une corrosion significative. L'état non saturé (« sec ») des alvéoles de déchets B et des galeries concourt à la forte limitation des processus de dégradation des bétons et de corrosion des composants métalliques et corrélativement à celle des processus mécaniques (fluage des argilites).

#### 7.9.4.2 Influence d'une période d'exploitation pluriséculaire sur la réversibilité

- **Pour les galeries**

Le maintien de la ventilation sur une période pluriséculaire (et donc d'un environnement « sec ») n'aurait pas d'influence sur l'évolution chimique des infrastructures en béton et des argilites en champ proche. En effet un état pseudo permanent est déjà établi à partir de la dizaine d'années d'exploitation du stockage. Les flux d'eau drainés et le profil de degré de saturation (dans les argilites) depuis la paroi de ces ouvrages évoluent ensuite très lentement : au bout de quelques centaines d'années supplémentaires, le profil de degré de saturation n'aurait progressé que de quelques centimètres. Il y a donc maintien des conditions d'une faible carbonatation atmosphérique des bétons et d'une faible corrosion des composants métalliques.

- **Pour les alvéoles de déchets B**

Des conclusions similaires à celles des galeries peuvent être apportées si ces alvéoles étaient maintenues ouvertes et ventilées sur une période pluriséculaire. Si les alvéoles de stockage étaient fermées comme dans le chronogramme d'exploitation conventionnel de référence, mais que le stockage restait ouvert sur une durée pluriséculaire, l'état hydraulique des alvéoles évoluerait peu durant cette période pluriséculaire. Cette évolution serait insuffisante pour entraîner une dégradation des bétons et une corrosion des composants métalliques.

- **Pour les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés**

La prolongation de l'exploitation du stockage sur une durée pluriséculaire ne conduirait pas à modifier de façon significative l'évolution des différents processus chimiques se déroulant au cours de cette période. En particulier, les vitesses de corrosion resteraient faibles et n'auraient pas de conséquence sur la tenue mécanique des composants métalliques (soutènement et chemisage). L'étanchéité du chemisage serait maintenue et, avec elle, l'absence de corrosion des colis de stockage, donc la préservation de leur intégrité physique. On notera toutefois que la zone désaturée des argilites autour des galeries d'accès au droit des alvéoles se propagerait au-delà du bouchon en béton des alvéoles, et donc n'atteindrait pas la partie utile des alvéoles. La partie utile resterait saturée et avec des conditions anoxiques.

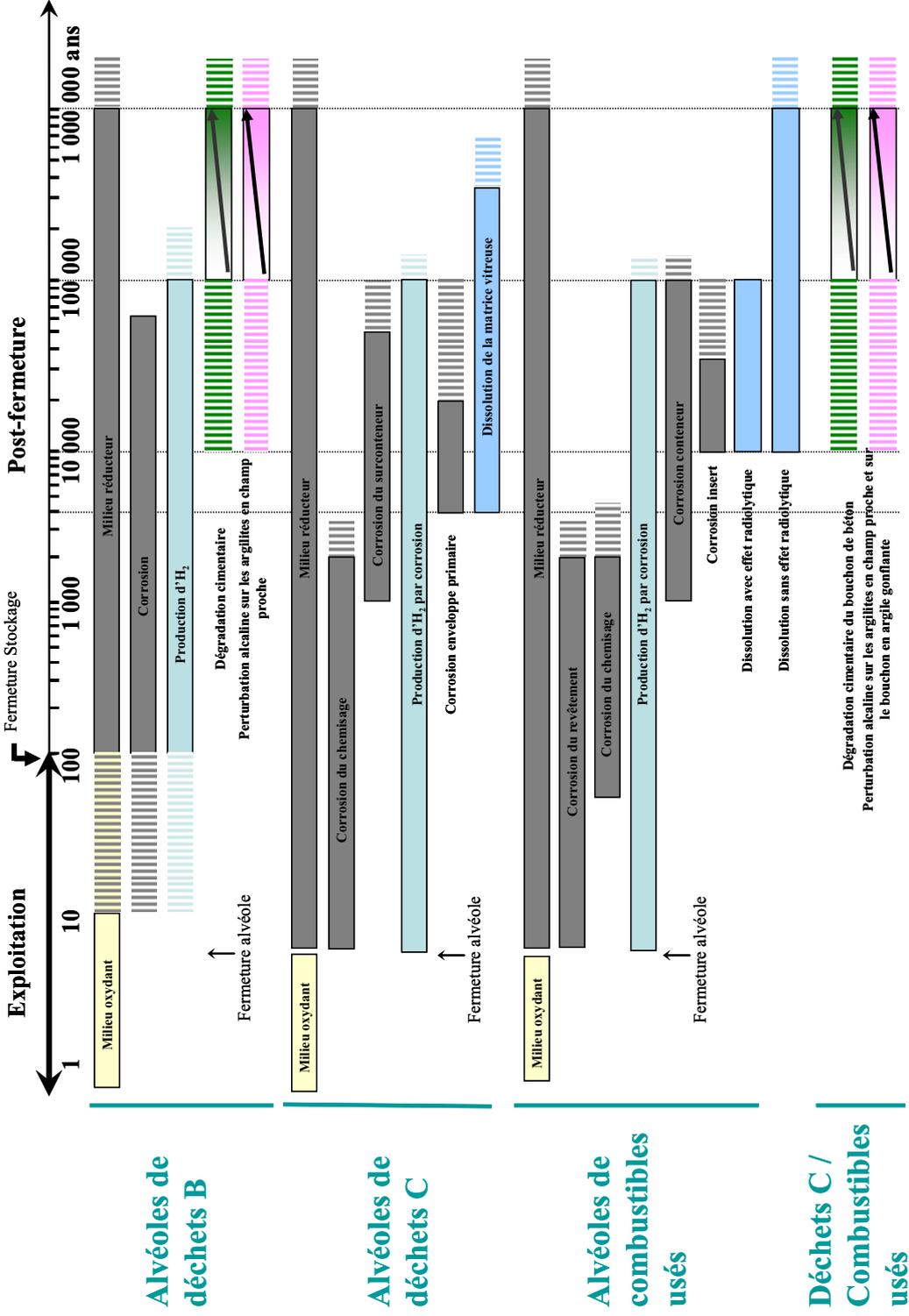


Figure 7.9.1 Chronogramme des principaux processus chimiques dans les alvéoles de déchets B, de déchets C et de combustibles usés (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage)

# 8

## L'évolution mécanique du stockage et du milieu géologique environnant

---

<b>8.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>339</b>
<b>8.2</b>	<b>La création d'une EDZ initiale : le creusement des ouvrages et la décharge mécanique instantanée .....</b>	<b>341</b>
<b>8.3</b>	<b>L'évolution mécanique des ouvrages ventilés durant la phase d'exploitation du stockage : les galeries, les alvéoles de déchets B et les puits.....</b>	<b>354</b>
<b>8.4</b>	<b>L'évolution mécanique des alvéoles de déchets B et des galeries en phase de postfermeture .....</b>	<b>360</b>
<b>8.5</b>	<b>L'évolution mécanique des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés .....</b>	<b>366</b>
<b>8.6</b>	<b>L'évolution mécanique des scellements .....</b>	<b>384</b>
<b>8.7</b>	<b>L'évolution mécanique à grande échelle .....</b>	<b>397</b>
<b>8.8</b>	<b>Synthèse sur l'évolution mécanique du stockage et du milieu géologique environnant .....</b>	<b>399</b>



## 8.1 Introduction

### 8.1.1 Une composante de l'évolution phénoménologique du stockage

Au sein de l'évolution phénoménologique globale du stockage et de son environnement géologique, l'évolution mécanique se situe sur trois plans.

- Elle est une donnée pour l'exploitation et l'observation du stockage, tant vis-à-vis de la protection des travailleurs au regard des risques liés aux travaux souterrains, que vis-à-vis des conditions de reprise des colis de déchets dans le cadre de la réversibilité du stockage.
- La dégradation mécanique des colis de déchets participe au relâchement des radionucléides, même si celui-ci est principalement piloté par des processus chimiques.
- L'évolution mécanique des scellements, des bouchons d'alvéoles, et des argilites en champ proche contribue à l'organisation des écoulements et des voies de transfert des solutés dans et autour du stockage. *In fine*, l'évolution mécanique joue donc un rôle dans le transfert des radionucléides après leur relâchement.

### 8.1.2 L'effet du comportement mécanique intrinsèque des argilites et des évolutions thermique, hydraulique et chimique du stockage

Avant la réalisation du stockage, la couche du Callovo-Oxfordien et le milieu géologique sont à l'équilibre mécanique sous un état de contrainte stable depuis plusieurs millions d'années, comme indiqué dans le § 3.2.5. La réalisation du stockage crée un déséquilibre mécanique. Une nouvelle évolution mécanique s'initie, d'abord du fait du creusement des ouvrages de stockage, entraînant un déconfinement de la roche à leur pourtour, puis sous l'effet de l'ensemble des processus thermiques, hydrauliques et chimiques qui sont mis en jeu dans le stockage et dans le milieu géologique environnant. L'évolution mécanique du stockage résulte ainsi :

- de sollicitations strictement mécaniques comme l'opération de creusement qui constitue une sollicitation mécanique majeure affectant les argilites en champ proche des ouvrages, avec la création d'une zone endommagée ;
- de couplages hydromécaniques. Le stockage crée un transitoire hydraulique, décrit dans le chapitre 6. Il est marqué par une période d'état non saturé de tout ou partie du stockage, notamment pendant son exploitation, au cours de laquelle les processus chimiques de dégradation des composants du stockage sont limités et le comportement différé des argilites autour des ouvrages est contraint par la zone endommagée non saturée. Après la fermeture du stockage, alors que la production d'hydrogène par la corrosion des métaux maintient les bétons d'infrastructure (soutènements/revêtements et colis de stockage des déchets B) et les remblais dans un état non saturé ( $S \approx 80\%$ ), elle n'influence pas la saturation des argilites et de l'argile gonflante (des bouchons, des scellements et des barrières ouvragées des alvéoles de combustibles usés) jusqu'à des degrés de saturation supérieurs à 97%. Après la fermeture du stockage, le retour à l'état totalement saturé est atteint après une durée de l'ordre de 200 000 ans ( $S > 97\%$  dans la totalité du stockage). L'état de saturation des composants du stockage et en particulier des argilites ou de l'argile gonflante influence de nombreux processus mécaniques comme le comportement différé des argilites ou le développement de la pression de gonflement de l'argile gonflante ;

- de couplages thermomécaniques. La mise en place des colis de déchets C et des colis de combustibles usés crée une charge thermique qui affecte principalement les zones de stockage et la couche du Callovo-Oxfordien environnante (cf. § 5). L'élévation de la température engendre des déformations et des contraintes dans les composants du stockage et dans les argilites. L'évolution du comportement mécanique des ouvrages de stockage concernés et des argilites environnantes est alors couplée à l'évolution des températures dans et autour des ouvrages ;
- de couplages chimicomécaniques. Les conditions hydrauliques et thermiques du stockage influencent l'évolution mécanique des ouvrages du stockage au travers de la corrosion et de la dégradation chimique de leurs composants. L'existence d'un état non totalement saturé des alvéoles de stockage de déchets B et des galeries sur une période de l'ordre de 100 000 à 200 000 ans limite la dégradation chimique des composants de ces ouvrages (notamment des bétons) et donc, la modification de leurs propriétés mécaniques. Après le retour à l'état saturé, compte tenu des faibles flux d'eau dans et autour du stockage et des faibles vitesses d'écoulement, les processus de dégradation chimique, et par conséquent les modifications des propriétés mécaniques des composants du stockage, sont lents et limités dans l'espace.

### **8.1.3 Une évolution concernant principalement le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche**

Les processus mécaniques mis en jeu concernent principalement le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien. En effet, hormis le champ proche des puits, les formations encaissantes sont suffisamment éloignées du stockage pour ne pas en être affectées mécaniquement. Leur évolution phénoménologique, et notamment la composante mécanique, est principalement gouvernée par les changements climatiques et la géodynamique interne (cf. § 9).

### **8.1.4 L'indépendance et la similitude de l'évolution mécanique**

Comme pour les processus thermiques, hydrauliques et chimiques, la conception compartimentée du stockage, les distances entre ouvrages et le mode de gestion à l'avancement concourent à une simplification de l'organisation des processus mécaniques et à une limitation des interactions mécaniques au sein du stockage, et par conséquent à l'échelle de la couche du Callovo-Oxfordien et des formations encaissantes.

C'est ainsi que (i) chaque zone de stockage suit une évolution mécanique propre indépendamment de celles des autres zones, et (ii) chaque module et chaque alvéole de stockage présentent des évolutions similaires. Ceci permet donc de traiter pour une grande part l'évolution mécanique du stockage et du milieu géologique environnant à l'échelle des ouvrages caractéristiques comme autant de motifs mécaniques élémentaires : alvéoles de stockage (déchets B, déchets C et combustibles usés), galeries au sens large, scellements et puits, aussi bien en période de réalisation et d'exploitation du stockage qu'après la fermeture jusqu'à un million d'années.

### **8.1.5 Les trois catégories d'ouvrage en terme d'évolution mécanique**

La nature des matériaux introduits dans le stockage et les évolutions thermique, hydraulique et chimique décrites dans les chapitres 5, 6 et 7 permettent de distinguer trois grandes catégories d'ouvrage en terme d'évolution mécanique :

- les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés. Elles se caractérisent par la présence de métaux et d'argile gonflante (bouchons d'alvéoles et barrières ouvragées pour les combustibles usés), par une charge thermique élevée (cf. § 5.4), l'absence de ventilation et par un retour à un état proche de la saturation rapide après fermeture ;

- les alvéoles de déchets B, les galeries et les puits. Ces ouvrages sont constitués majoritairement de béton. Leur charge thermique est faible ou inexistante (cf. § 5.5). Ils sont ventilés pendant la période d'exploitation. En phase de post-fermeture, la production d'hydrogène par corrosion des composants métalliques conduit au maintien d'un état non saturé ( $S < 80\%$ ) sur une période de 100 000 ans environ (cf. § 6) ;
- les scellements. Ces ouvrages combinent la présence d'argiles (argile gonflante et argilites) et de béton. Leur charge thermique peut être modérée ou nulle selon qu'ils sont positionnés à proximité d'alvéoles contenant des déchets exothermiques ou non (cf. § 5). Ils sont d'une certaine façon une combinaison des deux précédentes catégories d'ouvrages.

### 8.1.6 L'organisation du chapitre sur le comportement mécanique

Compte tenu des éléments généraux indiqués ci-dessus, la description de l'évolution mécanique du stockage et de son environnement géologique est structurée comme suit.

- On traite en premier lieu du stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien. Le comportement mécanique à grande échelle du stockage et des formations encaissantes est abordé en fin de chapitre (§ 8.7).
- L'opération de creusement d'un ouvrage qui constitue la sollicitation mécanique initiale de l'évolution mécanique est traitée spécifiquement dans une première partie (§ 8.2).
- Puis, en lien avec la charge thermique et les évolutions hydraulique et chimique, on aborde l'évolution mécanique par ouvrage type en distinguant, si nécessaire, la phase d'exploitation de la phase de postfermeture du stockage :
  - ✓ les alvéoles de déchets B, les galeries et les puits ventilés pendant la phase d'exploitation (§ 8.3),
  - ✓ les alvéoles de déchets B et les galeries après leur fermeture (§ 8.4),
  - ✓ les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés dès la phase d'exploitation (§ 8.5),
  - ✓ les scellements d'alvéole de déchets B, les scellements de galerie et les scellements de puits (§ 8.6).

## 8.2 La création d'une EDZ initiale : le creusement des ouvrages et la décharge mécanique instantanée

La réalisation d'un ouvrage du stockage entraîne un déconfinement de la roche à son pourtour avec pour conséquence immédiate une redistribution des contraintes, des déformations et éventuellement la création d'une zone mécaniquement endommagée par rapport à la roche initiale, appelée « EDZ » (Excavation Damaged Zone) (Encadré 8.1, (European commission, 2003)).

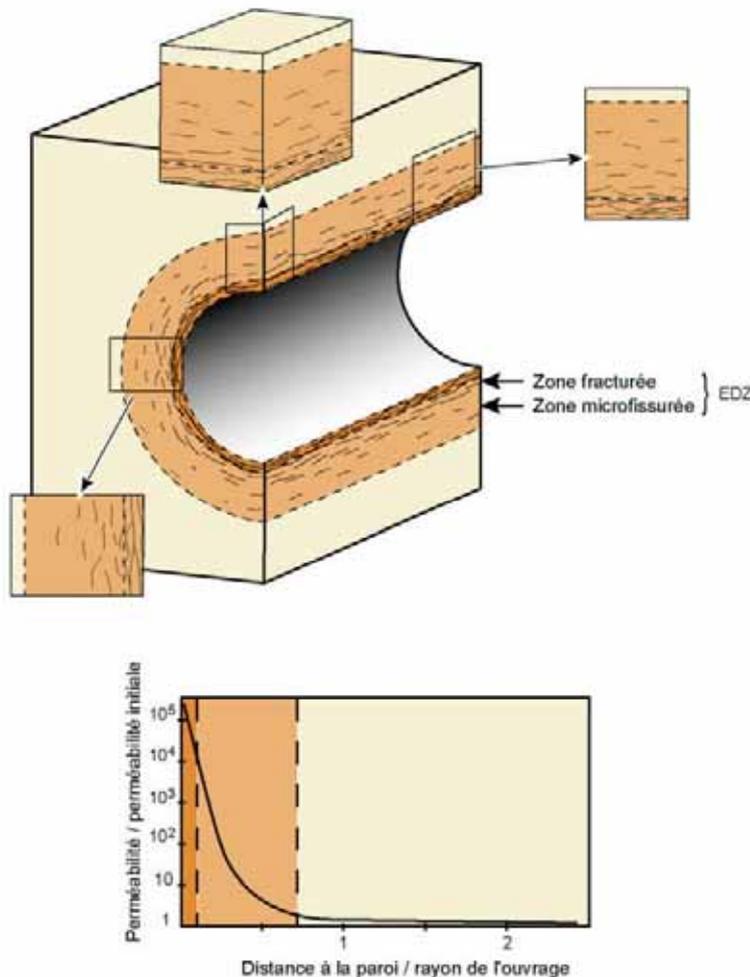
La géométrie, l'extension et l'intensité de l'EDZ dépendent du comportement mécanique de la roche, mais aussi de l'état de contrainte initial qui varie selon l'orientation de l'ouvrage par rapport aux contraintes régnant dans le massif et selon la profondeur considérée. L'EDZ dépend également de nombreux paramètres liés à la conception de l'ouvrage, tels que la méthode de creusement, le phasage de mise en place et le type de soutènement/revêtement, la forme et les dimensions de l'ouvrage. Ainsi, les dispositions conceptuelles retenues pour la réalisation d'un ouvrage permettent de limiter leur influence (méthode de creusement par abattage mécanique ou par tirs à l'explosif adoucis, ouvrages pseudo circulaires, ...).

*Encadré 8.1 L'EDZ ou la zone endommagée autour des ouvrages du stockage*

Le creusement d'un ouvrage peut entraîner la création d'une zone endommagée, dite **EDZ**, en paroi de l'excavation dans laquelle on distingue (European commission, 2003) (Figure ci-dessous) :

- une **zone fracturée**, au voisinage immédiat de l'ouvrage se produit si le seuil de rupture, qui correspond à la résistance mécanique maximale de la roche, est dépassé ; elle se caractérise par l'apparition de fractures plus ou moins connectées et pouvant induire une augmentation de la perméabilité de la roche ;
- une **zone microfissurée** qui se produit lorsque le seuil de fissuration est dépassé, soit au voisinage de l'ouvrage (si la zone fracturée n'est pas formée), soit derrière la zone fracturée. La décharge mécanique liée au creusement de l'ouvrage a pour effet des déformations qui se traduisent sous la forme d'une microfissuration diffuse peu connectée. Cette faible connectivité limite l'augmentation de la perméabilité.

L'EDZ n'inclut pas la **zone dite « influencée »** qui s'étend au-delà de la zone microfissurée. Celle-ci est le siège de modifications limitées du champ de contraintes et de déformations, sans incidence sur les propriétés de la roche (notamment la perméabilité).



*Schéma conceptuel de l'EDZ  
(hypothèse d'un état de contrainte initial isotrope dans le plan perpendiculaire à l'axe de l'ouvrage)*

### **8.2.1 Des comportements mécaniques différents selon les formations géologiques traversées**

Les puits traversent les formations encaissantes sus-jacentes à la couche du Callovo-Oxfordien et la partie supérieure de cette dernière jusqu'à atteindre le niveau d'implantation du stockage. Les ouvrages de stockage proprement dits (alvéoles, galeries) sont tous implantés dans le même niveau stratigraphique au centre de la couche du Callovo-Oxfordien.

Les formations encaissantes et la couche du Callovo-Oxfordien présentent des comportements mécaniques différents. L'Oxfordien carbonaté a des propriétés mécaniques relativement élevées (résistance et module de déformation) ; les marnes du Kimméridgien et les argilites du Callovo-Oxfordien sont plus déformables (Encadré 8.2).

En outre, on observe une variabilité verticale des propriétés mécaniques au sein de la couche du Callovo-Oxfordien, notamment dans la partie traversée par les puits. On distingue ainsi trois zones mécaniques. La zone supérieure, dite « zone A », dont la teneur en carbonates est plus élevée, a des propriétés mécaniques (résistance, module de déformation) supérieures à celles des « zones B et C » sous-jacentes et présente une alternance de bancs plus ou moins carbonatés qui induit une dispersion des propriétés mécaniques. La « zone C », dans laquelle sont implantés les ouvrages de stockage, se caractérise par une argilosité maximale se traduisant par un comportement mécanique plus déformable que celui de la « zone B » et une plus grande homogénéité des propriétés mécaniques (cf. § 3.3.1.4).

### Encadré 8.2 La loi de comportement mécanique à court terme des argilites du Callovo-Oxfordien (1/2)

Les propriétés mécaniques des roches se divisent en deux catégories :

- les résistances à des sollicitations mécaniques (compression, traction) définissant des seuils ou critères de rupture,
- les déformabilités sous l'effet des sollicitations mécaniques.

Le terme « **loi de comportement** » désigne d'une manière générale l'expression mathématique de la relation entre les contraintes ( $\sigma$ ), les déformations ( $\varepsilon$ ) et les vitesses de déformations. Le comportement et les propriétés mécaniques des roches sont étudiés en laboratoire à partir d'échantillons selon des essais de base mettant en jeu des sollicitations de compression ou de traction.

En compression uniaxiale, essai le plus communément réalisé, le comportement mécanique macroscopique des argilites peut être résumé en quatre domaines (Figure ci-dessous).

- **domaine I** : la relation entre les déformations et la contrainte est linéaire pour un faible chargement. Ce domaine, quasi réversible, est dit « élastique ». La pente de la courbe (déformation ; contrainte) est appelée module de déformation (ou module de Young – E).

- **domaine II** : à partir d'un certain niveau de contrainte, dit d'initiation de l'endommagement ( $\sigma_{end}$ ), apparaît un écart par rapport à la linéarité sur la courbe ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ), avec une augmentation des déformations plus rapide que dans le domaine élastique. Les déformations cessent d'être linéaires jusqu'à la résistance à la compression ( $\sigma_c$ ) et deviennent irréversibles. Elles sont liées à l'apparition d'une microfissuration de la roche qui s'accompagne d'une dégradation des propriétés mécaniques et d'une augmentation de la perméabilité de la roche. Il correspond au « domaine avec microfissuration ».

- **domaine III** : le domaine post-pic se traduit par un développement instable et non contrôlé du réseau fissural qui induit à son tour un endommagement croissant de la roche. Il est associé à une augmentation de la perméabilité de la roche avec la perte progressive de sa cohésion et l'atteinte d'une résistance résiduelle ( $\sigma_r$ ) inférieure à la résistance initiale. Il est appelé « domaine postrupture ou avec fracturation ».

- **domaine IV** : au-delà d'un certain niveau de déformation, domaine de résistance résiduelle sensiblement constante.

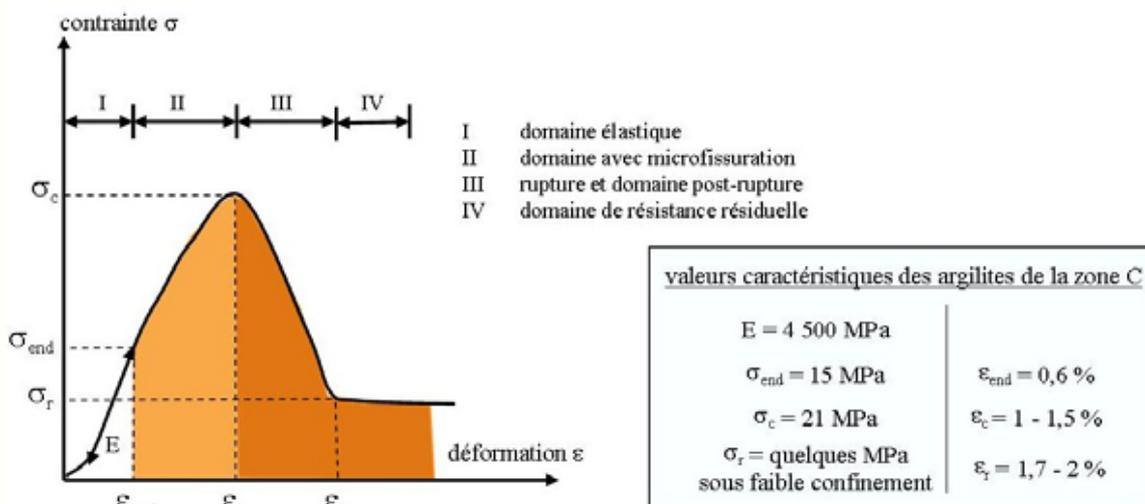


Schéma d'un essai de compression uniaxiale illustrant le comportement mécanique des argilites à court terme et valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques des argilites dans la zone d'implantation du stockage (Andra, 2005h, chapitre 25)

### *La loi de comportement mécanique à court terme des argilites (2/2)*

Le comportement mécanique à court terme des roches argileuses met ainsi en jeu plusieurs phénomènes :

- l'**élasticité** qui correspond à des modifications de distances interatomiques à partir des distances d'équilibre au repos est caractéristique de la fraction carbonatée,
- la **plasticité**, associée à l'existence de déformations permanentes et à la non-linéarité des courbes ( $\sigma-\varepsilon$ ), est caractéristique de la fraction argileuse,
- l'**endommagement** est la détérioration progressive par microfissuration de la cohésion du matériau conduisant à une variation des propriétés physiques et mécaniques.

L'établissement d'une loi de comportement à court terme permet de reproduire le comportement des argilites lors d'une sollicitation mécanique telle que le creusement d'un ouvrage. Elle doit permettre l'estimation des extensions des zones fracturée et microfissurée créées lors de la construction de l'ouvrage, la reproduction de la plus grande déformabilité de la roche microfissurée avant la rupture et la perte de la résistance mécanique de la roche fracturée après rupture. Elle doit également faire intervenir des variables, dites d'« écrouissage », qui permettent de reproduire le comportement non linéaire et irréversible de la roche.

Le comportement des argilites est dit de type « élastoplastique endommageable ». Le modèle adopté pour les évaluations de l'EDZ est le modèle élastoplastique de Hoek & Brown avec écrouissage, développé dans le cadre du projet MODEX-REP (Hoek & Brown, 1980 ; Su, 2003). Il s'agit d'un modèle purement mécanique ne permettant pas l'évaluation des propriétés hydrauliques (géométrie de fracturation/fissuration et perméabilité) des zones fracturée et microfissurée.

#### **8.2.2 Une EDZ initiale variable selon la profondeur considérée et l'orientation de l'ouvrage**

On rappelle que l'état de contrainte mécanique sur le site et sur la zone de transposition est légèrement anisotrope (cf. § 3.2.5) :

- la contrainte verticale ( $\sigma_v$ ) correspond au poids des terrains sus-jacents, soit environ 12 MPa à 500 m de profondeur,
- la contrainte horizontale mineure ( $\sigma_h$ ), orientée N65°, est proche de la contrainte verticale,
- et la contrainte horizontale majeure ( $\sigma_H$ ), orientée N155° est de l'ordre de 1 à 1,2 fois la contrainte horizontale mineure, soit 12 à 14,5 MPa.

Lorsque l'ouvrage est orienté selon la contrainte horizontale majeure, l'état de contrainte initial dans le plan perpendiculaire à l'axe de l'ouvrage est isotrope et l'EDZ se développe de manière circulaire. Selon cette orientation, le niveau de contrainte auquel est soumis l'ouvrage est également le plus faible et de fait, limite l'extension de l'EDZ. Par conception, les alvéoles de stockage et les galeries où seront mis en place les scellements sont orientées selon l'axe de la contrainte horizontale majeure afin de minimiser l'extension de l'EDZ initiale.

Au contraire, lorsque l'ouvrage est orienté selon l'axe de la contrainte horizontale mineure ou selon la contrainte verticale (cas des puits), il est soumis à un état de contrainte initial anisotrope sur sa périphérie qui se traduit par une EDZ de forme elliptique. L'EDZ se développe davantage au toit et au mur qu'aux parements pour un ouvrage horizontal et selon la direction de la contrainte horizontale mineure pour les puits (Figure 8.2.1).

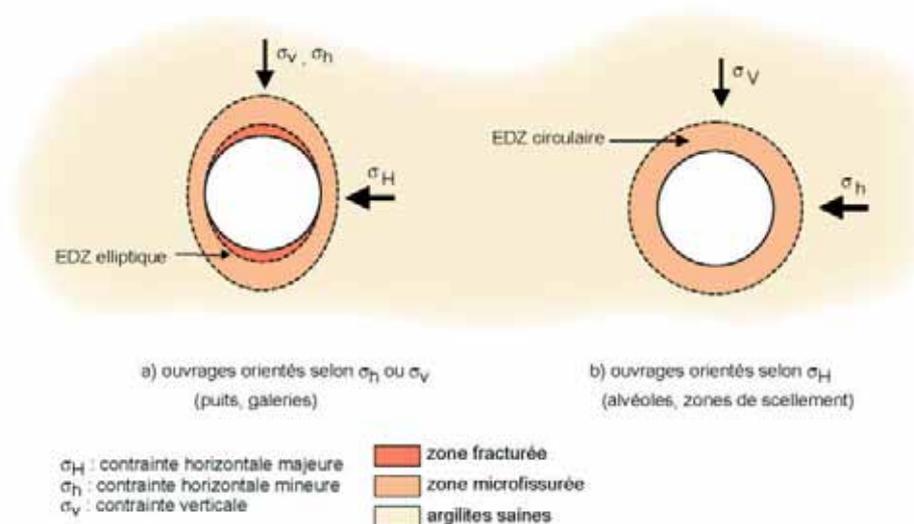


Figure 8.2.1 Géométrie de l'EDZ initiale en fonction de l'orientation des ouvrages par rapport à l'état de contrainte naturelle

### 8.2.3 L'extension de l'EDZ initiale autour des différents ouvrages de stockage

Les évaluations de l'extension de l'EDZ initiale autour des ouvrages de stockage reposent aujourd'hui essentiellement sur des modélisations numériques. Quelques mesures réalisées au niveau des marnes du Kimméridgien et de la « zone A » de la couche du Callovo-Oxfordien lors du creusement du puits principal du laboratoire souterrain de Meuse / Haute-Marne sont également disponibles.

#### 8.2.3.1 Les ouvrages du stockage dans les argilites

Les modélisations numériques d'évaluation de l'extension de l'EDZ initiale ont été réalisées :

- avec les propriétés mécaniques des argilites saturées (déterminées sur échantillons) pour chacune des zones géomécaniques. Afin de tenir compte des incertitudes sur les propriétés mécaniques de la roche à l'échelle de l'ouvrage, les paramètres représentatifs du comportement des échantillons les moins résistants ont été retenus ;
- avec l'hypothèse d'un déconfinement total sans soutènement (ouvrages de section circulaire) ;
- avec une loi de comportement à court terme des argilites de type élastoplastique endommageable. Développé dans le cadre du projet international MODEX-REP (Su, 2003), le modèle retenu est maîtrisé tant du point de vue théorique (modèle relativement simple intégrant les phénomènes mécaniques importants dans l'évaluation de l'EDZ initiale) que du calage des paramètres (Encadré 8.1) ;
- en considérant une anisotropie des contraintes horizontales sensiblement plus marquée que celle évaluée sur le site du laboratoire, soit un rapport entre les deux contraintes horizontales égal à 1,4 (cf. § 3.2.5) ;
- en tenant compte de l'influence de la profondeur du stockage (ouvrages de stockage situés à une profondeur variant de 500 m à 630 m sur la zone de transposition - cf. § 3.3.1.1) vis-à-vis de l'amplitude des contraintes initiales.

Les hypothèses de propriétés mécaniques minimales et d'une anisotropie de contraintes marquée retenues pour les modélisations vont dans le sens d'une estimation maximale de l'extension de l'EDZ initiale autour des ouvrages de stockage. L'influence des facteurs liés à la conception des ouvrages, telle la méthode d'excavation, la géométrie des ouvrages ou les conditions de soutènement n'ont pas été prises en compte.

En fonction de la profondeur de l'ouvrage et de son orientation, les évaluations de l'extension de la zone fracturée ainsi obtenues sont de 0 à 0,3 fois le rayon de l'ouvrage et celles de la zone microfissurée sont de 0,3 à 1,2 fois le rayon de l'ouvrage (Tableau 8.2.1). L'extension des perturbations réversibles (contraintes, déformations) est d'environ 3 fois le rayon de l'ouvrage si l'on considère que la zone influencée correspond à une variation des contraintes supérieure à 10 % par rapport aux contraintes initiales.

À une profondeur du stockage de 500 m, autour d'une alvéole de stockage ou d'une portion de galerie destinée à recevoir un scellement (toujours orientée selon la contrainte horizontale majeure), la zone fracturée ne se développe pas et la zone microfissurée isotrope a une extension de 0,5 fois le rayon de l'ouvrage. À la profondeur maximale sur la zone de transposition (630 m environ), le creusement d'un ouvrage orienté selon la contrainte horizontale majeure induit une zone fracturée de 0,1 rayon et une zone microfissurée de 0,7 rayon.

Ainsi, autour d'une alvéole de déchets B de 12 m de diamètre, située à une profondeur de stockage de 500 m, la zone fracturée ne se développe pas et la zone microfissurée a une extension isotrope de 3 m environ. Située à une profondeur de stockage de 630 m, la zone fracturée se développe et a une extension isotrope de 0,6 m. La zone microfissurée a une extension de 4 m.

À une profondeur du stockage de 500 m, la zone microfissurée a une extension inférieure à 20 cm autour d'une alvéole de déchets C (diamètre excavé de 0,7 m) et de 75 cm autour d'une alvéole de combustibles usés (diamètre excavé de l'ordre de 3 m). Si la profondeur du stockage considérée est 630 m, une zone fracturée de 3-4 cm pour une alvéole de déchets C et de 15 cm pour une alvéole de combustibles usés se développe autour de l'alvéole. L'extension de la zone microfissurée est de 25 cm pour une alvéole de déchets C et de plus de un mètre pour une alvéole de combustibles usés.

Un ouvrage orienté selon la contrainte horizontale mineure développe une zone fracturée d'extension jusqu'à 0,1 rayon au toit et au mur et une zone microfissurée de 0,3 à 0,7 rayon à 500 m de profondeur. À 630 m de profondeur, l'extension maximale de la zone fracturée atteint 0,3 rayon et celle de la zone microfissurée atteint 1,2 rayon. Ainsi, à 500 m de profondeur, une galerie d'accès d'orientation perpendiculaire à celle des alvéoles et d'un diamètre de 8 m a une zone fracturée d'extension jusqu'à 40 cm et une extension de la zone microfissurée de 1,2 m à 2,8 m.

Au droit des raccordements, les zones fracturée et microfissurée atteignent des extensions plus importantes (jusqu'à 2 fois plus qu'en section courante). Ainsi, seules la tête d'alvéole subit l'influence mécanique de la galerie d'accès. Au-delà, notamment dans la portion d'alvéole recevant les colis et le bouchon d'argile gonflante, il n'y a pas d'influence mécanique de la galerie d'accès.

Compte tenu des distances entre les ouvrages (5 diamètres environ), il n'y a pas d'interaction mécanique entre ouvrages voisins. Ainsi, l'état initial des argilites du Callovo-Oxfordien, au moment de l'excavation des différents ouvrages, n'est pas perturbé mécaniquement par les ouvrages voisins, hormis au niveau des raccordements ou des intersections entre ouvrages.

Des mesures géophysiques (vitesses microsismiques) ont été réalisées dans deux forages radiaux au puits d'accès principal du laboratoire de Meuse / Haute-Marne au niveau de la « zone A » du Callovo-Oxfordien afin d'évaluer l'extension de l'EDZ initiale consécutive au creusement. Les forages sont orientés selon les directions des contraintes horizontales majeure et mineure. L'analyse des carottes des forages ne révèle pas de fracturation ou de fissuration détectable à l'œil nu. L'endommagement est donc limité et sans développement d'une zone fracturée. L'extension de l'EDZ mesurée dans les deux forages est du même ordre de grandeur, ce qui suggère que l'état de contrainte initial n'est pas ou faiblement anisotrope dans la « zone A » des argilites du Callovo-Oxfordien. Celle-ci est inférieure à 40 cm pour un puits de 6 m de diamètre, soit environ 0,1 fois le rayon du puits (Barnichon & Su, 2005a). L'endommagement mesuré est dû d'une part au déconfinement de la roche et, d'autre part aux éventuels effets dynamiques du creusement à l'explosif. Ces premières observations réalisées *in situ* sont cohérentes avec les évaluations numériques (Tableau 8.2.1).

Tableau 8.2.1 *Evaluations des géométries et des extensions de l'EDZ initiale dans les argilites du Callovo-Oxfordien pour les différents ouvrages du stockage (Barnichon & Su, 2005a) (Barnichon & Su, 2005c) (Su & Barnichon, 2005)*

Zone géomécanique	Profondeur de référence (stockage à 500 m)		Profondeur maximale sur la zone de transposition (stockage à 630 m)	
	Ouvrages orientés parallèlement à $\sigma_H$ (N 155°) (alvéoles de stockage, zones de scellement)	Ouvrages orientés - parallèlement à $\sigma_H$ (N 65°) (galeries) - verticaux (puits)	Ouvrages orientés parallèlement à $\sigma_H$ (N 155°) (alvéoles de stockage, zones de scellement)	Ouvrages orientés : - parallèlement à $\sigma_H$ (N 65°) (galeries) - verticaux (puits)
Zone A Exemple de la niche expérimentale du laboratoire de recherche Epaisseur $\approx$ 40 m	0,1 R 	0 à 0,3 R 	0,3 R 	0,2 à 0,7 R 
Zone B Epaisseur $\approx$ 15 m	0,3 R 	0,1 à 0,5 R 0 à 0,1 R 	0,5 R 	0,3 à 1,0 R 0 à 0,2 R 
Zone C Zone d'implantation d'un stockage Epaisseur $\approx$ 40 m	0,5 R 	0,3 à 0,7 R 0 à 0,1 R 	0,7 R 0,1 R 	0,5 à 1,2 R 0 à 0,3 R 

Zone fracturée

Zone microfissurée

Argilites saines

$\sigma_H$  : contrainte horizontale majeure  
 $\sigma_h$  : contrainte horizontale mineure

### 8.2.3.2 Les puits dans les formations encaissantes sus-jacentes

Dans les marnes du Kimméridgien, l'extension de l'EDZ initiale, mesurée *in situ* lors du creusement du puits principal du laboratoire de recherche souterrain, est d'environ 0,5 fois le rayon du puits. L'évolution de la perméabilité, mesurée en paroi, est faible et de l'ordre de grandeur des variations de la perméabilité de la formation (Bauer *et al.*, 2003).

Aucune évaluation ou mesure de l'extension de l'EDZ initiale n'est disponible dans l'Oxfordien carbonaté, mais ses propriétés mécaniques, déterminées sur échantillons, sont telles qu'il ne devrait pas y avoir de fissuration de la roche en paroi des puits du fait du déconfinement et l'endommagement devrait rester limité au voisinage immédiat des puits (Barnichon & Su, 2005c).

### 8.2.4 La convergence associée à la décharge mécanique initiale

La modification de l'état de contrainte dans les roches résultant du creusement d'un ouvrage s'accompagne d'une convergence. Une partie de la convergence se produit en avant du front de taille et avant la mise en place du soutènement. Mais la convergence se produisant après la mise en place du soutènement/revêtement a pour effet de réduire les jeux entre le massif rocheux et le soutènement/revêtement.

- Dans les argilites du Callovo-Oxfordien, la convergence « instantanée » qui accompagne le creusement est estimée à 0,5 - 0,8 % (Barnichon & Su, 2005a).
  - ✓ Pour une alvéole de déchets C ou une alvéole de combustibles usés, la convergence due au creusement est ainsi de quelques millimètres. Compte tenu des jeux de l'ordre de quelques centimètres entre le chemisage (ou le revêtement pour une alvéole de combustibles usés) et la paroi de l'alvéole, cette convergence est insuffisante pour refermer totalement les jeux de mise en place. La convergence différée (fluage), plus discrète, contribue ensuite progressivement à la poursuite de la fermeture des vides (Encadré 8.3).
  - ✓ Pour une alvéole de déchets B, une galerie ou un puits, le soutènement provisoire est assuré par un béton projeté (complété éventuellement par des boulons d'ancrage) et/ou par des cintres en interface directe avec les argilites. La convergence des argilites entraîne alors un début de mise en charge du soutènement. La pression exercée sur le béton projeté et/ou les cintres est inférieure à 1 MPa (Barnichon & Su, 2005a). La vitesse de la convergence décroît rapidement dans le temps et un délai de pose du revêtement définitif de quelques semaines à quelques mois après la réalisation de l'ouvrage (comme pour une alvéole de déchets B ou une galerie) permet de limiter la pression des terrains exercée sur le revêtement. D'après le retour d'expérience de tunnels instrumentés creusés dans des roches comparables, la pression exercée sur le revêtement au bout de quelques années est de l'ordre de quelques MPa (Leger *et al.*, 1999).
- La convergence des marnes du Kimméridgien atteint moins de 0,1 %, soit 5 mm de déplacement à la paroi pour un puits de 6 m de diamètre durant la phase non soutenue (quelques jours) (Bauer *et al.*, 2003). La pose du soutènement/revêtement au fur et à mesure de l'excavation bloque ensuite la convergence des marnes en paroi et entraîne un début de mise en charge du revêtement.
- De la même manière que pour les marnes du Kimméridgien, pendant le fonçage d'un puits, la pose du soutènement/revêtement au fur et à mesure de l'excavation au niveau de l'Oxfordien carbonaté bloque sa convergence en paroi (Barnichon & Su, 2005c). De plus, l'Oxfordien carbonaté présente peu ou pas d'aptitude à la convergence différée.

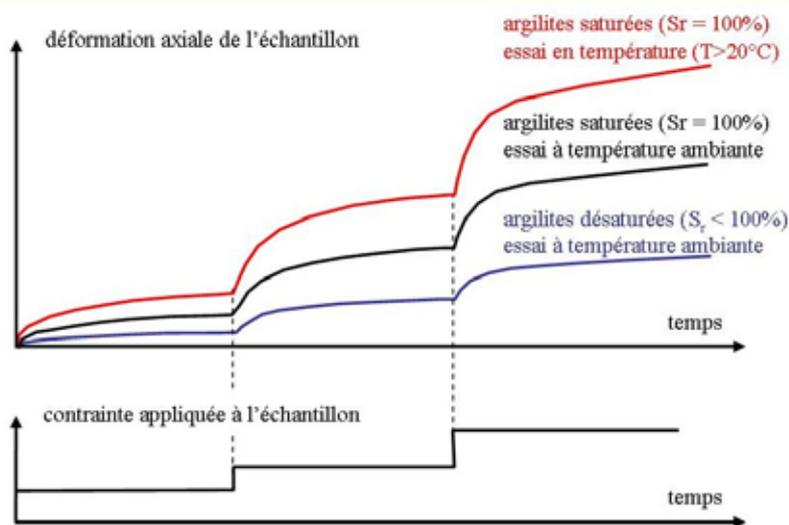
### Encadré 8.3 *Le comportement mécanique différé des argilites du Callovo-Oxfordien*

Outre leur comportement instantané (ou à court terme), les argilites présentent un comportement différé, c'est-à-dire qu'il y a une évolution dans le temps des contraintes et/ou déformations non associées directement à une évolution des chargements mécaniques. Pour les argilites, le comportement différé est contrôlé par la fraction argileuse, la fraction carbonatée ne montrant pas en général d'effets différés. Dans le contexte d'un ouvrage souterrain, il se traduit par la convergence en paroi et des déformations des argilites.

Les effets différés sont mis en évidence par des essais de fluage sur échantillons (et moins souvent par des essais de relaxation). L'essai de fluage consiste en une compression uniaxiale ou triaxiale avec mesure des déformations différées en fonction du temps pour une contrainte donnée.

Les essais de fluage réalisés sur les argilites montrent que (Andra, 2005h, chapitre 25) (Figure ci-dessous) :

- les déformations différées sont de faible amplitude. L'ordre de grandeur de la vitesse de fluage est de  $10^{-2}$  à  $10^{-3}$   $\text{an}^{-1}$  pour des durées d'essais de quelques semaines à quelques mois ;
- sous un état de contraintes constant, la vitesse de fluage diminue progressivement dans le temps : au bout de quelques années, la vitesse de fluage est de l'ordre de  $10^{-4}$   $\text{an}^{-1}$  ;
- la vitesse de fluage augmente avec la contrainte appliquée et avec la température (courbe rouge sur la figure) : sous une même contrainte, la vitesse de fluage est triplée à 80 °C par rapport à celle mesurée à température ambiante ;
- en revanche, la désaturation freine le fluage (courbe bleue sur la figure). En particulier, une désaturation importante (degré de saturation de 40 %) bloque le fluage.



*Schéma d'un essai de fluage illustrant le comportement mécanique différé des argilites en fonction du degré de saturation et de la température*

L'essai de relaxation qui consiste à bloquer la déformation axiale au cours d'un chargement uniaxial ou triaxial simule le comportement des argilites autour d'un ouvrage revêtu. La diminution de la vitesse de fluage au cours du temps s'accompagne d'une diminution du déviateur des contraintes.

Le comportement différé des argilites peut être décrit par un modèle de comportement à long terme de type modèle de Lemaître (ou Norton modifié) décrivant la relation entre la vitesse de déformation différée et la contrainte ainsi que la déformation différée cumulée (Andra, 2005h, chapitre 25).

Les vitesses de déformation différée des argilites en fonction des contraintes et du temps, leur évolution avec la température ou la désaturation sont, à ce stade, obtenues uniquement sur échantillons et pour de courtes durées d'essai (quelques semaines à quelques années). La prédiction du comportement à long terme des argilites à plusieurs dizaines, centaines ou milliers d'années suppose une extrapolation.

### 8.2.5 La perméabilité de l'EDZ initiale

L'EDZ est caractérisée par l'existence de fractures et/ou de microfissures qui ont pour effet d'augmenter la perméabilité des roches. La densité de fracturation et de fissuration est maximale en paroi de l'ouvrage, puis décroît au sein de la zone fracturée et de la zone microfissurée pour tendre *in fine* vers l'état naturel de la roche saine. Ainsi l'augmentation de la perméabilité est d'autant plus faible que l'on s'éloigne de la paroi de l'ouvrage (Encadré 8.1).

Les perméabilités qui résultent de la création de l'EDZ ont été mesurées *in situ* dans les argiles raides au Mont Terri et à Tournemire (Boisson, 1998 ; Bossart *et al.*, 2002) ainsi que dans les marnes du Kimméridgien sur le site de Meuse / Haute-Marne (Bauer *et al.*, 2003). Ces mesures, réalisées en forage, concernent de faibles volumes rocheux et permettent d'évaluer la perméabilité de manière ponctuelle (chambre de mesures de quelques centimètres). Les augmentations de perméabilité obtenues au niveau de fractures repérées dans les premiers décimètres de la zone fracturée sont de 5 - 6 ordres de grandeur au maximum et de 2 - 3 ordres de grandeur dans la zone microfissurée. À plus grande échelle (pluridécimétrique à plurimétrique), la connectivité des fissures diminuant avec l'éloignement de la paroi, la perméabilité équivalente des zones fracturée et microfissurée est inférieure à la perméabilité obtenue par mesure ponctuelle.

Les perméabilités mesurées sur échantillons microfissurés d'argilites du Callovo-Oxfordien (prélevés dans la « zone C ») sont augmentées de 1 à 2 ordres de grandeur par rapport à la perméabilité initiale (Barnichon & Su, 2005a). Les essais prévus dans le laboratoire souterrain donneront les valeurs de la perméabilité *in situ* de la zone microfissurée et dans l'éventuelle zone fracturée. Compte tenu des évaluations numériques d'extension de l'EDZ (absence ou faible extension de zone fracturée - Tableau 8.2.1) et du retour d'expérience du laboratoire du Mont Terri, une augmentation de la perméabilité de 2 à 3 ordres de grandeur par rapport à la perméabilité initiale des argilites semble prévisible dans la zone microfissurée.

Des travaux de modélisation numérique du développement de la fissuration consécutive au creusement ont été réalisés avec le code PFC où la relation entre la géométrie des fissures (ouverture et connectivité) avec la perméabilité est évaluée par modélisations particulières. Ces modélisations, réalisées pour un ouvrage situé à 500 m de profondeur, ont montré le développement de microfissures connectées jusqu'à des profondeurs de 0,2 fois le rayon de l'ouvrage et une augmentation de la perméabilité associée de 2 à 3 ordres de grandeur (Figure 8.2.2, (Barnichon & Su, 2005a)) alors que l'extension de la zone microfissurée évaluée par modélisation numérique est de 0,5 fois le rayon de l'ouvrage (Tableau 8.2.1).

Ces conclusions corroborent :

- l'absence d'une zone fracturée caractérisée par une forte augmentation de perméabilité, pour un ouvrage situé à 500 m de profondeur. Dans le cas où cette zone existe, on peut estimer l'augmentation maximale de la perméabilité de 4 à 5 ordres de grandeur environ ;
- l'augmentation maximale de 2 à 3 ordres de grandeur de la perméabilité dans la zone microfissurée ;
- la diminution de la connectivité des fissures avec la distance à la paroi de l'ouvrage au sein de la zone microfissurée. Ceci se traduit par une augmentation de la perméabilité par rapport à la perméabilité initiale des argilites uniquement sur une portion de la zone microfissurée à proximité immédiate de la paroi de l'ouvrage. Au-delà, les microfissures ne sont pas connectées et n'induisent pas d'augmentation de la perméabilité des argilites (Figure 8.2.2).

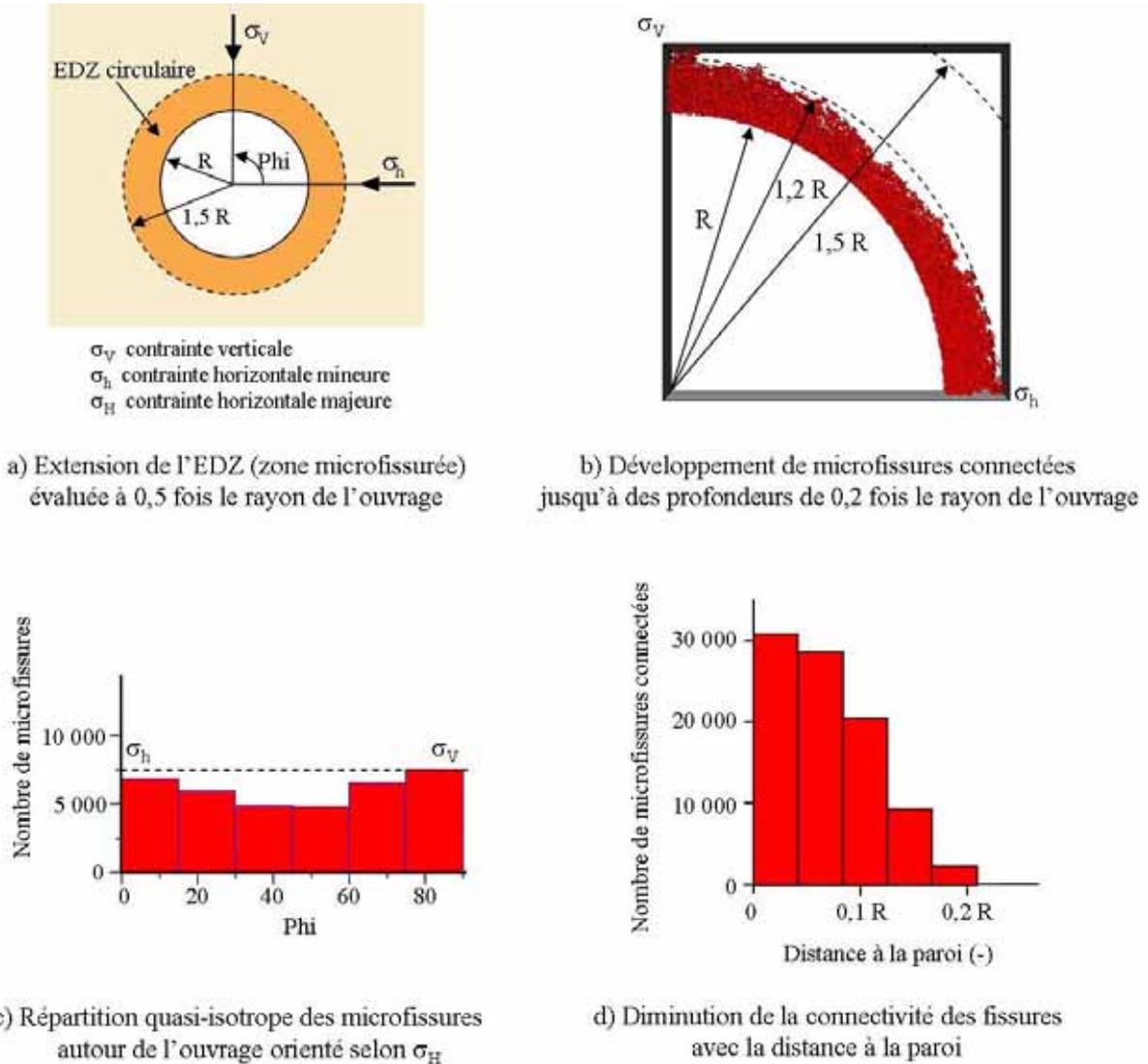


Figure 8.2.2 Exemple de réseau de microfissures connectées obtenu par simulation de l'excavation d'un ouvrage orienté selon  $\sigma_H$  avec le code PFC

Les fractures et fissures dans l'EDZ sont préférentiellement orientées parallèlement à l'ouvrage (Whittaker *et al.*, 1992) (Encadré 8.1). À l'échelle de l'ensemble des fractures, la connectivité (même partielle) des fractures permet de considérer une perméabilité isotrope dans la zone fracturée. Dans la zone microfissurée, l'effet du creusement peut induire des orientations privilégiées des microfissures dont l'effet sur l'anisotropie de la perméabilité est difficile à prédire.

L'EDZ initiale consécutive à la réalisation d'un ouvrage évolue (en extension et en intensité) sous l'effet de différents mécanismes en fonction des conditions thermiques et hydrauliques auxquelles il est soumis au cours des phases d'exploitation et de postfermeture (cf. § 8.3 à 8.6 pour les différents types d'ouvrages).

### **8.3 L'évolution mécanique des ouvrages ventilés durant la phase d'exploitation du stockage : les galeries, les alvéoles de déchets B et les puits**

#### **8.3.1 Les contextes thermique, hydraulique et chimique**

Durant leur exploitation, les puits, les galeries et les alvéoles de déchets B sont soumis à une ventilation qui a pour conséquence une désaturation des infrastructures en béton et des argilites de l'EDZ initiale en quelques années. Cette désaturation, décrite dans le § 6, se propage ensuite très lentement pour atteindre les argilites saines à la fin de la phase d'exploitation. Compte tenu des conditions d'hygrométrie qui règnent dans ces ouvrages, le degré de saturation des bétons du soutènement/revêtement et des argilites dans la zone fracturée est homogène et inférieur à 30 - 40 %. Au-delà, il augmente rapidement jusqu'à plus de 90 % en limite de la zone microfissurée de l'EDZ. Les argilites saines gardent un degré de saturation supérieur à 97 % quelques mètres au-delà de l'EDZ (Figure 8.3.1).

Comme indiqué dans le § 5 au niveau d'une galerie de module de déchets C ou de combustibles usés, les argilites et le soutènement/revêtement subissent une élévation de température, tandis que la ventilation maintient la température de l'air dans la galerie constante. La température maximale dans les argilites et le soutènement/revêtement est de l'ordre de 50 °C cent ans après la mise en place des colis de stockage (cf. § 5.4). Une alvéole de déchets B contenant des déchets exothermiques ne subit pas ce phénomène, car la ventilation permet l'évacuation de la quasi-totalité des calories émises par les colis ; la charge thermique n'intervient qu'après la fermeture de l'alvéole (Figure 8.3.1).

Les contextes hydraulique et thermique de la phase d'exploitation conduisent à ce que la dégradation chimique des bétons de soutènement/revêtement et des colis de stockage de déchets B, ainsi que la corrosion des composants métalliques soient limitées (cf. § 7.2). Elles sont donc sans incidence sur l'évolution mécanique de l'ouvrage. Celle-ci est principalement pilotée par les effets de la désaturation des argilites en champ proche (Encadré 8.4) et, dans une moindre mesure, par les effets des élévations de température le cas échéant (Encadré 8.5).

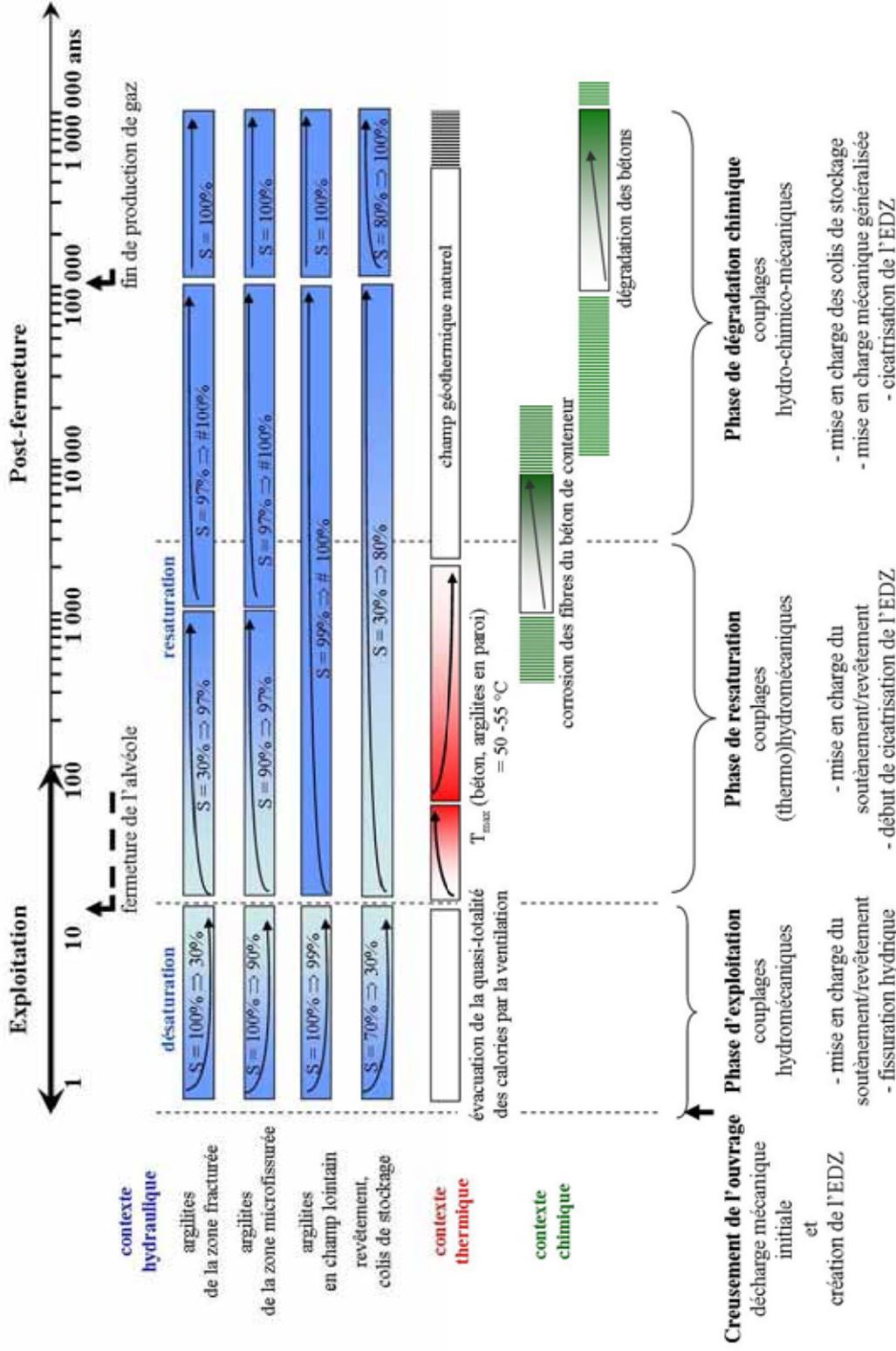


Figure 8.3.1 Chronogramme de l'évolution mécanique d'une alvéole de déchets B : contextes thermique, hydraulique et chimique en phase de réalisation, phase d'exploitation et phase de postfermeture (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage)

#### **Encadré 8.4    *Le comportement couplé hydromécanique des argilites du Callovo-Oxfordien***

##### ***À l'état saturé***

Le comportement mécanique des argilites saturées ou la relation « contrainte – déformation » peut être décrit suivant le principe des contraintes effectives : les déformations résultent des contraintes qui s'exercent réellement entre les solides constituant le squelette. Ces contraintes dites « effectives » ( $\sigma'$ ) sont définies comme la différence entre les contraintes totales exercées sur le squelette ( $\sigma$ ) et tout ou partie de la pression de l'eau interstitielle ( $p$ ) :

$$\sigma' = \sigma - bp$$

Le coefficient de Biot ( $b$ ) décrit l'aptitude du squelette à reprendre la pression de l'eau interstitielle. Pour des milieux granulaires de type sable, le coefficient de Biot est égal à 1. Pour les argilites, il serait de l'ordre de 0,6 en liaison avec leur structure porale très petite (Andra, 2005h, chapitre 25).

##### ***À l'état non saturé***

La non-saturation se caractérise par l'existence de ménisques d'eau dans les pores. Ces ménisques créent des forces de tension aux interfaces solide/eau liquide/gaz qui se traduisent par des forces de contact entre les solides du squelette, assimilables à des contraintes effectives. Il en résulte une rigidification des argilites (augmentation de la cohésion et de la contrainte à la rupture). La résistance à la compression uniaxiale des argilites augmente d'un facteur de 3 à 6 entre un échantillon saturé et un échantillon totalement sec (Andra, 2005h, chapitre 25) et la vitesse de fluage des argilites diminue (Encadré 8.3).

Lorsque la désaturation est importante et/ou hétérogène, les forces de tension associées à une contraction des minéraux de type smectites par la perte d'eau peuvent conduire à une fissuration. Les déformations contractantes induites par la désaturation des argilites sont de l'ordre de 0,5 % lorsque l'humidité relative passe de 100 % à 66 %. Elles sont comparables aux déformations mécaniques créées à la paroi d'un ouvrage lors de son creusement (Andra, 2005h, chapitre 25), (Ata *et al.*, 2002).

##### ***Le gonflement des argilites***

Les argilites présentent une teneur en smectites de quelques pourcents à dix pourcents. Ces minéraux confèrent aux argilites un potentiel de gonflement et de pression de gonflement, comme pour les argiles gonflantes retenues pour les scellements et les bouchons d'alvéoles (Encadré 2.7) : le gonflement est estimé à quelques pourcents et la pression de gonflement, définie comme la pression qu'il faut exercer sur un échantillon pour s'opposer à tout gonflement, à 1 - 3 MPa (Andra, 2005h, chapitre 25).

### Encadré 8.5 *Le comportement couplé thermo-hydro-mécanique des argilites*

#### *À l'état saturé*

Les variations de température, par rapport à la température géothermale naturelle, engendrent deux types d'effets.

3Elles modifient *le comportement mécanique* des argilites de manière quantitative (déformabilité, résistance, endommagement, vitesse de fluage) ou même qualitative (le refroidissement rend les roches plus fragiles, l'échauffement les rend plus ductiles).

- Les travaux réalisés sur les argilites du Callovo-Oxfordien ne mettent pas en évidence d'influence significative de la température, jusqu'à 100 °C, sur les caractéristiques de **comportement mécanique à court terme** des argilites (déformabilité, résistance et endommagement).
- Sur le **comportement différé**, une élévation de la température des argilites augmente leur vitesse de fluage. Pour une température de 80 °C, la vitesse de fluage est triplée par rapport à la vitesse de fluage à température ambiante (Encadré 8.3).

3Elles engendrent des *dilatations thermiques élastiques*, qui, à leur tour, peuvent créer des contraintes. Un refroidissement crée des contraintes de traction, un échauffement crée des contraintes de compression. L'ordre de grandeur de ces contraintes, souvent appelées « contraintes thermiques » est :

$$\sigma \approx -E \alpha \Delta T$$

avec	E	module de déformation (MPa)
	$\alpha$	dilatation thermique (°C <sup>-1</sup> )
	$\Delta T$	variation de température (°C)

La dilatation thermique des argilites du Callovo-Oxfordien est égale à 10<sup>-5</sup> °C<sup>-1</sup>, le module de déformation est de 4 500 MPa. Une élévation de la température de 20 °C crée ainsi une contrainte thermomécanique de l'ordre de 1 MPa.

#### *À l'état non saturé*

L'élévation de la température a un effet antagoniste de celui de la désaturation, à savoir une activation du fluage des argilites (Encadré 8.3). La combinaison de ces effets opposés est actuellement peu appréhendée, mais pour des élévations de température limitées, les effets de la désaturation devraient rester prédominants, à savoir un ralentissement du fluage.

Une élévation de la température entraîne également le développement de contraintes thermomécaniques dans les argilites avec la dilatation des argilites et de l'eau interstitielle.

### 8.3.2 Les puits, les alvéoles de déchets B et les galeries non soumises à une élévation de la température

Les puits, les alvéoles de déchets B et les portions de galeries distantes des zones de stockage des déchets C et des zones de stockage des combustibles usés ne subissent pas ou peu d'élévation de la température durant leur exploitation. Leur évolution mécanique est pilotée par les effets de la désaturation sur les formations géologiques, à savoir (i) le ralentissement du fluage des formations argileuses (argilites et marnes du Kimméridgien) qui limite la mise en charge des soutènements/revêtements et (ii) la fissuration hydrique en paroi des ouvrages.

### 8.3.2.1 La mise en charge du soutènement/revêtement

La convergence des argilites, résultant de la modification de l'état de contrainte liée au creusement, se poursuit. Toutefois, compte tenu de la diminution de la vitesse de fluage des argilites dans le temps et par la désaturation des argilites (Encadré 8.3), la mise en charge du soutènement/revêtement par les argilites reste limitée sur la durée séculaire à pluriséculaire de l'exploitation.

La pression exercée par les argilites sur le soutènement/revêtement, évaluée avec la vitesse de fluage des argilites saturées, est d'environ 4 MPa après 100 ans (Figure 8.3.2, (Barnichon & Su, 2005a)). L'augmentation de la pression au-delà du siècle est inférieure à 0,5 MPa par siècle, et cette augmentation se ralentit dans le temps (cf. § 8.4.2). Le ralentissement (ou le blocage) du fluage des argilites avec leur désaturation limite légèrement la pression exercée par les argilites : l'effet d'une diminution de la vitesse de fluage de 25 % est une mise en charge du soutènement/revêtement inférieure de 0,5 MPa à 100 ans, soit environ 3,5 MPa.

Il en va de même pour les marnes du Kimméridgien traversées par les puits. En effet, la convergence des marnes est limitée par leur désaturation et ce d'autant plus que celles-ci sont situées entre 100 et 120 m de profondeur et par conséquent, soumises à un faible état de contraintes. L'Oxfordien carbonaté, par ailleurs, a un potentiel de fluage limité.

Le béton retenu pour le revêtement des ouvrages a une résistance de 60 MPa (à 28 jours, c'est-à-dire en prenant en compte les effets du retrait par dessiccation) ce qui correspond à une pression radiale maximale admissible de l'ordre de 8 MPa. Ainsi, quelle que soit la formation géologique considérée, les contraintes dans le soutènement/revêtement qui résultent de la pression exercée par les roches sont largement inférieures à la résistance du béton de revêtement (peu ou pas dégradé chimiquement à ce stade), ce qui assure la stabilité mécanique de l'ouvrage sur une période pluriséculaire (Barnichon & Su, 2005a ; Barnichon & Su, 2005c).

### 8.3.2.2 La fissuration hydrique des argiles en champ proche

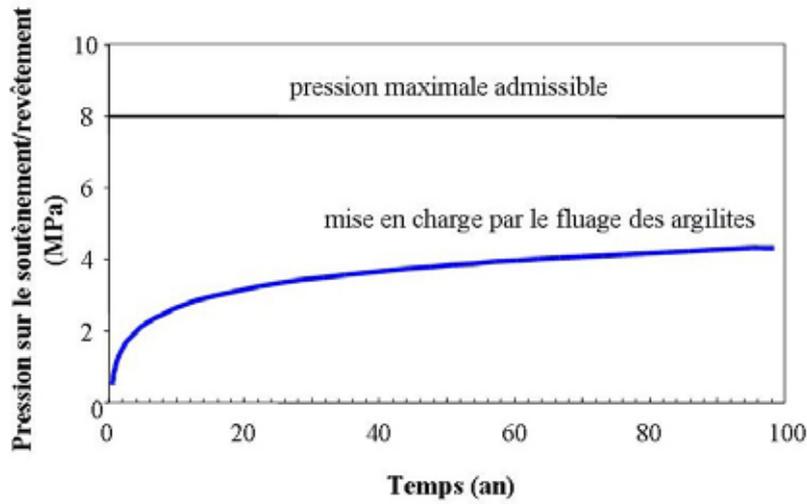
La désaturation entraîne une fissuration hydrique des formations argileuses (marnes du Kimméridgien et argilites du Callovo-Oxfordien) (Encadré 8.4). Dans la zone fracturée (lorsqu'elle est formée) où le degré de saturation est de l'ordre de 30 %, la fissuration provoquée par le couplage hydromécanique affecte la totalité de la zone. Dans la zone microfissurée, le degré de saturation augmente rapidement quand on s'éloigne de la paroi et seule une pellicule de roche de quelques décimètres est affectée par la fissuration hydrique. Au-delà, le degré de saturation reste suffisamment élevé pour ne pas induire de fissuration hydrique (Barnichon & Su, 2005a), (Figure 8.3.2). Les observations *in situ*, dans le tunnel de Tournemire notamment, ont montré que cette fissuration se développe radialement aux parois des ouvrages lorsque l'humidité relative de l'air diminue et qu'une augmentation de l'humidité relative de l'air entraîne la fermeture de ces fissures (Ramambasoa, 2001).

Par ailleurs, l'amélioration des propriétés mécaniques et le ralentissement du fluage des argilites avec la désaturation de la zone microfissurée (Encadré 8.4, Encadré 8.3 et Encadré 8.4) et le confinement des argilites par le soutènement/revêtement empêchent un développement supplémentaire de l'EDZ. Tant que l'ouvrage est en phase d'exploitation (durée d'ordre séculaire à pluriséculaire), l'extension de l'EDZ est peu modifiée par rapport à celle de l'EDZ initiale.

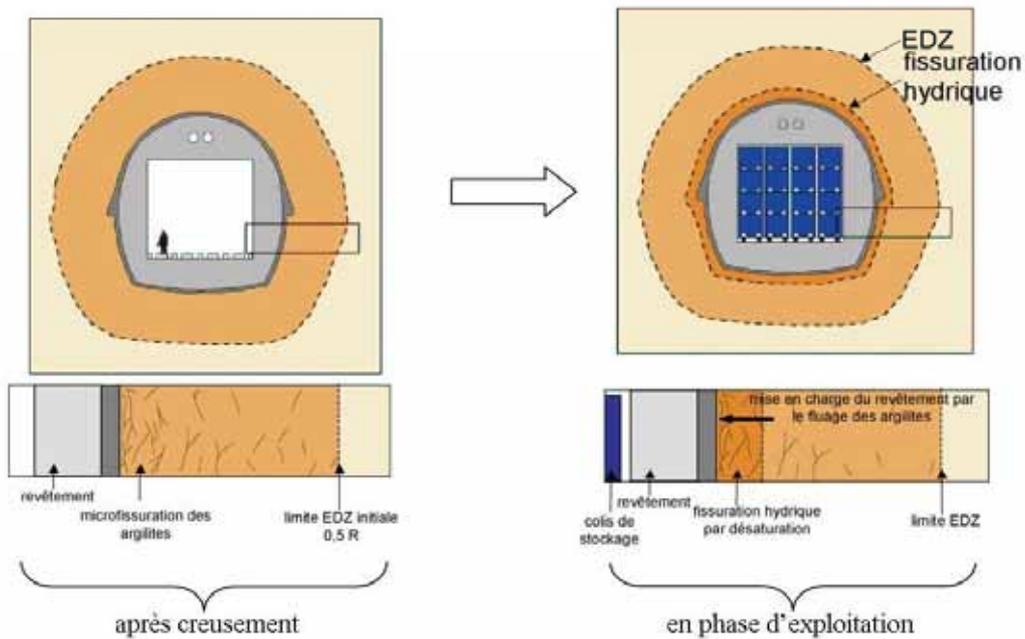
### 8.3.2.3 Des colis de stockage de déchets B soumis uniquement à leur poids

Dans une alvéole de déchets B, les colis de stockage sont empilés et sont ainsi soumis au poids propre des colis sus-jacents. Le radier de l'alvéole est également soumis au poids des colis de stockage empilés. Durant la période ventilée, la dégradation chimique des bétons de soutènement/revêtement et des colis de stockage est faible, voire nulle, et ils conservent leurs propriétés mécaniques (cf. § 7.2).

Les surcharges liées aux colis de stockage sont ainsi sans conséquences sur la stabilité mécanique des colis de stockage, de leur empilement et de l'alvéole (notamment le radier).



a) Mise en charge du soutènement/revêtement par le fluage des argilites



b) Schémas de l'évolution de l'EDZ autour d'une alvéole de déchets B au cours de la phase d'exploitation

Figure 8.3.2 Mise en charge du soutènement/revêtement d'une alvéole de déchets B par le fluage des argilites et évolution de l'EDZ autour de l'alvéole durant la phase d'exploitation

### **8.3.3 Les galeries soumises à une élévation de la température**

Les galeries d'accès aux alvéoles de déchets C et aux alvéoles de combustibles usés sont soumises aux effets de la désaturation et aux effets thermiques. L'élévation de la température sur la durée séculaire de l'exploitation ne dépasse pas 30 °C (cf. § 5.4). Elle entraîne des contraintes thermomécaniques dans les argilites et dans le béton de soutènement/revêtement.

#### **8.3.3.1 Le chargement thermomécanique des argilites en champ proche**

Dans les argilites, une telle élévation de la température crée des contraintes thermomécaniques de compression inférieures à 2 MPa. Ces niveaux de contraintes n'induisent aucun endommagement perceptible dans les argilites autour des ouvrages. De la même manière que pour les ouvrages non soumis à une élévation de température, une pellicule de fissuration hydrique de quelques décimètres se forme autour des ouvrages sans entraîner une extension supplémentaire de l'EDZ (Barnichon & Su, 2005a ; Barnichon & Su, 2005b).

#### **8.3.3.2 Le chargement thermomécanique du soutènement/revêtement**

La charge thermomécanique sur le soutènement/revêtement augmente progressivement avec l'élévation de la température pour atteindre une valeur maximale de l'ordre de 1,5 MPa vers 100 ans. Cette charge s'ajoute à la pression exercée par les argilites. Durant la phase d'exploitation, la somme de la charge thermique et de la pression exercée par les argilites reste largement inférieure à la charge maximale admissible du béton de revêtement non dégradé chimiquement. Le soutènement/revêtement joue son rôle de confinement et assure la stabilité de l'ouvrage.

## **8.4 L'évolution mécanique des alvéoles de déchets B et des galeries en phase de postfermeture**

### **8.4.1 La fermeture des alvéoles de déchets B et des galeries**

La fermeture d'une alvéole de déchets B et le remblayage d'une galerie n'induisent pas de sollicitation mécanique spécifique directe. Ils correspondent au passage à des conditions hydrauliques différentes de celles de la phase ventilée, à savoir l'arrêt de la désaturation et le début de la resaturation de l'ouvrage fermé.

L'ouvrage de scellement d'une alvéole de déchets B est, dans son principe, identique à celui d'une galerie. Il est mis en place dans la galerie d'accès de l'alvéole. On se reportera au § 8.6 pour la description de l'évolution mécanique du scellement d'une alvéole de déchets B. Seule la partie utile de l'alvéole de déchets B est traitée ici.

#### **8.4.1.1 Les matériaux de fermeture**

En tête de l'alvéole de déchets B, un écran de radioprotection constitué d'une double rangée de blocs de béton est mis en place en amont des colis de stockage. Le remplissage du reste de la tête d'alvéole est constitué d'un béton coulé en masse.

Le matériau de base envisagé pour le remblayage d'une galerie est les argilites excavées qui auront été stockées en surface en verse pendant toute l'exploitation du stockage. Il est mis en forme par broyage et mélange, puis mis en place par compactage à l'optimum Proctor suivant des couches inclinées successives de manière à remplir l'ensemble du volume et à ne pas laisser de jeux de mise en place entre le remblai et la partie supérieure de la galerie. Cette mise en œuvre, testée dans le laboratoire d'Aspö en Suède (SKB, 2001), devrait permettre d'obtenir un remblai ayant une densité sèche en

place de 1,6 remplissant entièrement le volume de la galerie. À sa mise en place, le remblai n'a aucun rôle mécanique. Le confinement des argilites est assuré par le soutènement/revêtement.

#### 8.4.1.2 Les contextes thermique, hydraulique et chimique après la fermeture

Comme indiqué dans le § 6, la fermeture d'un ouvrage ventilé a pour effet d'enclencher une resaturation progressive des composants de l'ouvrage et des argilites à son pourtour. Les alvéoles de déchets B et les galeries remblayées ne sont saturées ( $S > 90\%$ ) qu'au-delà de 100 000 ans du fait de la désaturation initiale, puis de la production et du transfert d'hydrogène de corrosion après la fermeture des ouvrages. La resaturation des argilites, dans un premier temps, n'est pas affectée par la production d'hydrogène. Dans la zone microfissurée autour de l'ouvrage, des degrés de saturation supérieurs à 97 % sont atteints dès le premier millier d'années. Au-delà, la pression d'hydrogène produit par corrosion empêche la saturation à 100 % d'une pellicule d'EDZ autour de l'ouvrage, mais n'induit pas une désaturation supplémentaire.

La pression d'hydrogène augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale de 7 MPa dans les alvéoles de déchets B vers 500 ans, de 6-7 MPa dans les zones de stockage des déchets C vers 2 000 - 3 000 ans, et de 9 MPa dans les zones de combustibles usés vers 2 000 - 3000 ans également (cf. § 6).

La description de la charge thermique du § 5 précise que la température augmente au sein et autour d'une alvéole de déchets B exothermiques après l'arrêt de la ventilation. La température maximale est atteinte dès les premières années après la fermeture, puis la décroissance thermique s'amorce. La température dans les argilites au pourtour de l'alvéole atteint 45 – 50 °C environ 20 ans environ après la fermeture, elle devient inférieure à 30 °C au-delà de 2 000 ans. Dans une galerie d'accès aux alvéoles contenant des déchets C ou des combustibles usés, la température continue à croître légèrement durant quelques décennies (jusqu'à 55 °C environ), puis décroît progressivement. Elle est inférieure à 40 °C après 1 000 années environ (§ 5.4).

La saturation des composants d'un ouvrage déclenche également sa dégradation chimique (bétons de soutènement/revêtement, colis de stockage de déchets B, ...). Le § 7.4 souligne que les faibles écoulements d'eau limitent fortement la dégradation chimique des bétons de soutènement/revêtement et des colis de stockage par les eaux des argilites qui s'étend sur des durées de plusieurs centaines de milliers d'années. En particulier, *a minima* pendant plusieurs centaines d'années à plusieurs milliers d'années, le soutènement/revêtement est peu dégradé chimiquement et conserve ses propriétés mécaniques initiales. Toutefois, bien que les colis de stockage restent dans un environnement cimentaire stable, la corrosion des fibres en acier contenues dans le béton des colis de stockage diminue la résistance en traction du béton de manière significative en quelques milliers d'années. En outre, les produits de corrosion expansifs des colis primaires (notamment les colis types métalliques B1 et B5), après avoir comblé dans un premier temps les jeux de manutention entre l'enveloppe en béton et le logement des colis primaires, exercent des contraintes supplémentaires au sein des colis de stockage, participant ainsi à la dégradation des propriétés mécaniques globales des colis de stockage.

Par ailleurs, les propriétés mécaniques des argilites autour d'un ouvrage et du remblai d'une galerie sont peu affectées par la perturbation alcaline associée à la resaturation (cf. § 7.4). En outre, les processus de dissolution et de précipitation de la perturbation alcaline contribuent à une « cicatrisation hydraulique » des fissures de l'EDZ.

Au regard des contextes thermique, hydraulique et chimique résumés ci-dessus (Figure 8.3.1), l'évolution mécanique de ces ouvrages peut être décrite selon deux grandes étapes successives.

- Une première étape correspondant à la resaturation des argilites en paroi de l'ouvrage. Elle a pour conséquence (i) une réactivation du fluage des argilites et leur gonflement qui s'accompagnent d'un début de cicatrisation des fissures de l'EDZ et (ii) la poursuite de la mise en charge du soutènement/revêtement jusqu'à atteindre sa résistance à la rupture.
- Dès lors que la résistance à la rupture du soutènement/revêtement est atteinte, l'ouvrage dans sa globalité est mis en charge par les argilites. L'évolution mécanique est alors principalement gouvernée par l'évolution différée des argilites avec la dégradation chimique des bétons (soutènement/revêtement, colis de stockage).

## 8.4.2 La mise en charge du soutènement/revêtement et le début de la cicatrisation de l'EDZ

### 8.4.2.1 Le soutènement/revêtement

Au fur et à mesure de leur resaturation, les argilites développent un gonflement (Encadré 8.4) qui se traduit alors par une pression de gonflement appliquée sur le soutènement/revêtement. Cette pression est évaluée à 1 - 3 MPa (Andra, 2005h, chapitre 25).

Par ailleurs, les argilites atteignent des degrés de saturation suffisants pour réactiver le fluage dès les premières dizaines à la centaine d'années après la fermeture de l'ouvrage. Ce fluage, éventuellement accéléré par l'élévation de la température dans certaines portions des ouvrages, diminue la contrainte déviatorique dans les argilites et augmente la contrainte radiale qui s'applique sur le béton de soutènement/revêtement et sur les fissures dans l'EDZ.

Le fluage et le gonflement des argilites induisent ainsi une augmentation de la mise en charge du soutènement/revêtement qui conduit à une augmentation des contraintes dans le revêtement jusqu'à atteindre la résistance du béton au bout de quelques milliers d'années à 10 000 ans, alors que ses propriétés mécaniques ne sont pas réduites par la dégradation chimique (Barnichon & Su, 2005a). Dans les alvéoles de déchets B exothermiques et dans les galeries d'accès des alvéoles de déchets C ou de combustibles usés, les contraintes thermomécaniques de dilatation participent également à la mise en charge du soutènement/revêtement. Alors que l'extrados du soutènement/revêtement subit des contraintes de compression élevées (de l'ordre de 45 MPa), des contraintes de traction apparaissent à l'intrados. Ceci peut se traduire par l'apparition de fissures de traction à l'intrados du béton de soutènement/revêtement. Néanmoins, le béton conserve une résistance résiduelle qui empêche la rupture généralisée du soutènement/revêtement et reste suffisante pour confiner les argilites à leur pourtour.

Ainsi, au cœur des ouvrages, les colis de stockage de déchets B ou le remblai des galeries ne subissent pas la mise en charge des argilites à l'échelle de temps de 10 000 ans environ.

### 8.4.2.2 Les argilites du Callovo-Oxfordien

Comme indiqué ci-dessus, le soutènement/revêtement des ouvrages continue à assurer son rôle de confinement mécanique des argilites et empêche ainsi toute déformation libre.

La pression de gonflement, appliquée sur le soutènement/revêtement se transmet également aux fissures de l'EDZ, principalement orientées parallèlement aux ouvrages. Elle permet la réduction de leur ouverture et par conséquent, la diminution de la perméabilité des argilites dans cette zone. L'expérimentation « EH » d'évolution de la perméabilité de l'EDZ avec la resaturation réalisée au Mont Terri montre que la resaturation et le gonflement associé des argiles réduisent la transmissivité des fissures de 2 à 3 ordres de grandeur au bout de 3 ans (Meier *et al.*, 2000). Des mesures de

perméabilité à l'eau d'échantillons d'argilites fissurées confirment cette évolution : le gonflement des argilites au niveau d'une fracture permet de restaurer la perméabilité à l'eau des argilites saines au bout de quelques jours (Barnichon & Su, 2005a).

De la même manière que pour la pression de gonflement, la contrainte radiale développée par le fluage des argilites, de l'ordre de quelques MPa après la resaturation, s'applique sur les fissures de l'EDZ et entraîne leur compression avec une diminution de la perméabilité évaluée à 2 ordres de grandeur (Bühler *et al.*, 2003). Les contraintes induites par le fluage des argilites étant plus fortes que celles induites par le gonflement, la diminution de la perméabilité des argilites de l'EDZ est plus importante sous l'effet du fluage que sous celui du gonflement. Avec la recompression des fissures, la perméabilité de l'EDZ diminue ainsi de un à plusieurs ordres de grandeur pour tendre vers la perméabilité des argilites saines (Figure 8.4.1).

#### **8.4.2.3 Les colis de stockage de l'alvéole de déchets B**

En l'absence de rupture du soutènement/revêtement, l'empilement des colis de stockage au sein de l'alvéole n'est pas soumis à des contraintes autres que celles dues aux poids propres des colis et reste stable. Par ailleurs, les déformations par dilatation liées à l'élévation de la température dans une alvéole contenant les déchets exothermiques dans un premier temps, puis par contraction avec le refroidissement sont absorbées par les jeux fonctionnels entre les colis primaires et le conteneur et ne créent pas de contraintes thermomécaniques au sein de ces matériaux (Barnichon & Su, 2005a).

#### **8.4.2.4 Le remblai des galeries**

À l'échelle des premiers milliers d'années, alors que la resaturation complète du remblai est empêchée par la production d'hydrogène de corrosion, un léger tassement du remblai sous l'effet de son poids est susceptible de se produire et d'entraîner la création d'un vide en clé de voûte. Le confinement des argilites étant toujours assuré par le soutènement/revêtement, le remblai n'est pas soumis à la mise en charge des argilites.

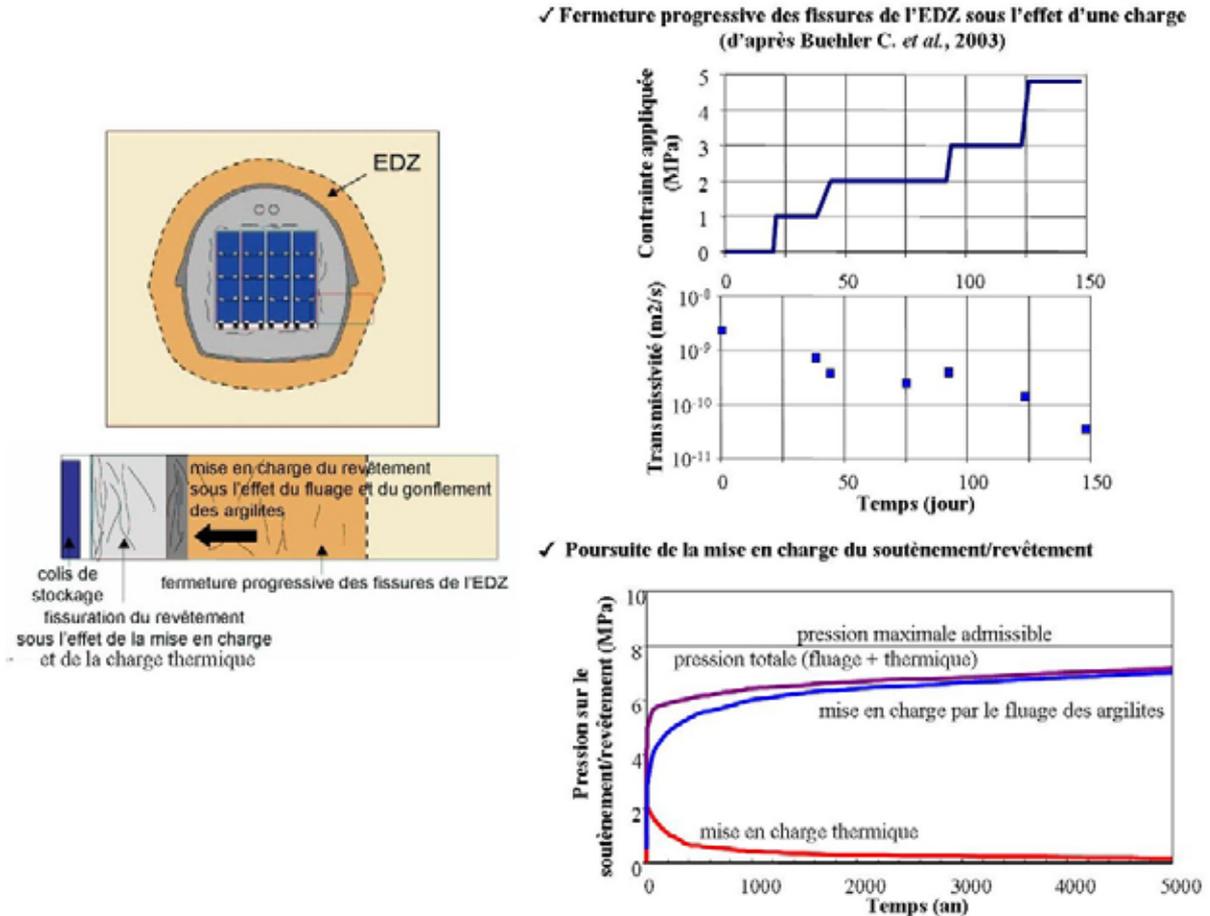


Figure 8.4.1 Mise en charge du soutènement/revêtement d'une alvéole de déchets B exothermiques et évolution de l'EDZ autour de l'alvéole, durant les premiers milliers d'années après fermeture

### 8.4.3 L'évolution mécanique avec la dégradation chimicomécanique progressive des composants des ouvrages

Au-delà de l'apparition des premiers dommages à l'intrados du soutènement/revêtement, quelques milliers d'années à 10 000 ans après la fermeture, la mise en charge du soutènement/revêtement par les argilites se poursuit, mais avec une vitesse de fluage des argilites décroissante. En outre, les propriétés mécaniques du soutènement/revêtement diminuent progressivement avec sa dégradation chimique.

Sous l'effet des contraintes en traction qui se propagent depuis l'intrados vers le centre du revêtement et des contraintes en compression qui augmentent et qui deviennent supérieures à la résistance du béton sur plus de la moitié de l'épaisseur du revêtement, le soutènement/revêtement s'endommage mécaniquement. Des fissures traversantes se produisent depuis l'intrados vers la périphérie et le comportement du soutènement/revêtement peut alors être assimilé à celui d'un ouvrage en « maçonnerie sèche » : l'agencement des blocs de béton et l'amortissement des sollicitations par distorsion entre blocs confèrent une résistance résiduelle par frottement au soutènement/revêtement. La mise en charge par les argilites accentue cet effet de « serrage » et évite une rupture généralisée du soutènement/revêtement.

Au fur et à mesure de la dégradation chimicomécanique du béton, l'ampleur des déformations des argilites et des déplacements du soutènement/revêtement est pilotée par le taux de vides des ouvrages. Celui-ci ne dépasse pas quelques pourcents que ce soit dans les alvéoles de déchets B ou dans les

galeries remblayées. Les efforts mécaniques dus au fluage des argilites qui se transmettent au soutènement/revêtement dégradé se traduisent par une convergence du soutènement/revêtement avec la mobilisation des vides (vides entre les colis de stockage pour l'alvéole de déchets B, vides en clé de voûte sous l'effet du tassement du remblai dans la galerie). Le déconfinement des argilites qui en résulte est peu important et n'entraîne pas de perturbations supplémentaires des argilites.

Dans l'*alvéole de déchets B*, les colis de stockage sont alors progressivement chargés mécaniquement par les argilites au travers du soutènement/revêtement. En parallèle, la corrosion des fibres en acier des colis de stockage des déchets B et des colis primaires a pour conséquence une diminution de la résistance des colis de stockage. En quelques milliers d'années, la résistance à la traction du béton fibré est réduite de 25 % environ (cf. § 7.4.2.5). La mise en charge des colis de stockage se traduit par une fissuration à la base des colis et un tassement progressif de l'empilement des colis avec une nouvelle concentration des vides, essentiellement en clé de voûte de l'alvéole. De la même manière que précédemment, il s'en suit un nouveau déconfinement des argilites qui, selon le taux de vides ainsi mobilisé, peut s'accompagner ou non d'un nouvel endommagement des argilites. Dans le cas le plus défavorable (important taux de vides internes aux colis de stockage et mobilisation soudaine de ces vides), l'endommagement maximum ainsi induit est similaire à l'endommagement créé lors du creusement de l'alvéole (soit une zone microfissurée d'extension 0,5 fois le rayon de l'ouvrage).

L'évolution mécanique de la *galerie* est similaire à celle de l'alvéole de déchets B. Le remblai de la galerie se resature progressivement avec la diminution, puis l'arrêt de la production d'hydrogène de corrosion (un degré de saturation supérieur à 90 % est atteint au-delà de 100 000 ans), et s'accompagne d'un faible gonflement. La pression de gonflement est estimée à 0,1 MPa. Par ailleurs, le remblai au contact des bétons de soutènement/revêtement subit, de même que les argilites, une perturbation alcaline. L'extension de la zone fortement reminéralisée, pluridécimétrique (cf. § 7.6.2), est faible, comparée au diamètre du remblai. Les propriétés mécaniques du remblai sont peu affectées. La rigidité du remblai (module de déformation initial de 10 MPa) est suffisante pour limiter, puis stabiliser les déformations des argilites. Au fur et à mesure de l'extension de la perturbation alcaline dans le remblai, la rigidité de la zone de remblai perturbée diminue légèrement et permet une faible déformation. Toutefois, au regard de l'extension de la zone perturbée par rapport au diamètre de la galerie, la déformation maximale possible du remblai perturbé est inférieure au pourcent (Andra, 2005). Par conséquent, l'ensemble (argilites/béton en cours de dégradation/remblai localement perturbé) se stabilise progressivement dans le temps suivant la diminution de la vitesse de fluage. Les lentes déformations par fluage des argilites permettent un « serrage » de la galerie avec la mise en charge du remblai et sa rigidification.

Des réajustements localisés et limités internes à l'ouvrage (rupture locale, foisonnement, comblement des vides par fluage) se poursuivent sur la centaine à plusieurs centaines de milliers d'années jusqu'à atteindre progressivement un équilibre. Les déformations au sein de l'ouvrage deviennent faibles et s'accompagnent d'une diminution du déviateur de contraintes, d'une diminution des déformations (ralentissement du fluage) et d'une augmentation de la contrainte moyenne. Les fissures de l'EDZ se ferment progressivement sous l'effet de l'ensemble de ces mécanismes. L'équilibre est atteint lorsque le déviateur de contraintes induit par la construction et réactivé par la dégradation des composants de l'ouvrage s'annule et que l'état initial des contraintes lithostatiques du milieu géologique est rétabli.

Le chargement de l'ensemble des composants de l'ouvrage par le milieu géologique contribue à augmenter leur rigidité et leur densité. Progressivement, l'ouvrage est mécaniquement intégré au milieu géologique. Après l'atteinte de l'équilibre, le fluage des argilites, et dans une moindre mesure, les processus de précipitation et de dissolution de la perturbation alcaline permettent une recompression quasi complète des fissures de l'EDZ.

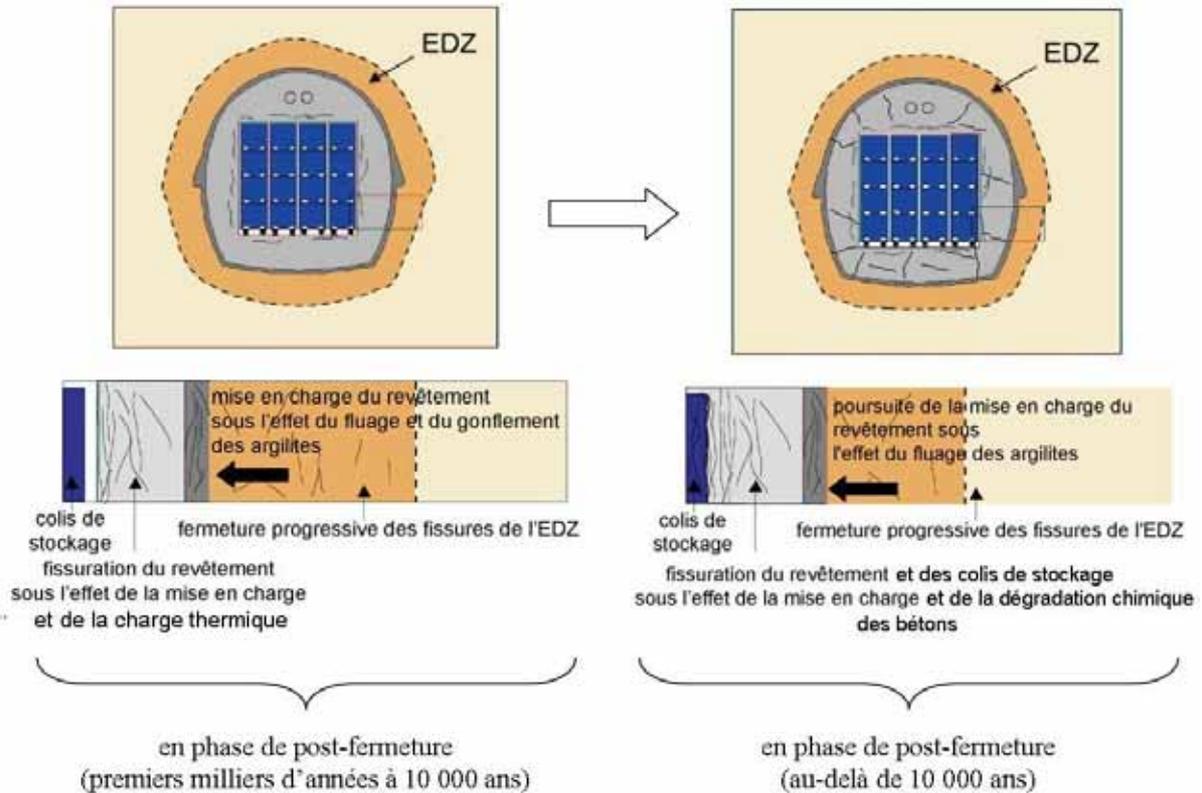


Figure 8.4.2 Schémas de l'évolution de l'EDZ autour d'une alvéole de déchets B avec la dégradation chimique des bétons (au-delà de 10 000 ans)

## 8.5 L'évolution mécanique des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés

Les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés ne sont pas ventilées après la mise en place des colis de stockage. La resaturation des alvéoles commence dès la pose d'un capot d'étanchéité peu après la mise en place des colis. Dans ces conditions, on peut considérer que la période d'exploitation de ces ouvrages non ventilés ne diffère que très peu sur le plan de l'évolution mécanique de la phase de postfermeture qui débute réellement après la mise en place du bouchon d'alvéole en argile gonflante.

### 8.5.1 Les comportements mécaniques de la partie utile et de la tête d'alvéole

La conception des alvéoles de stockage en deux parties distinctes par la nature de leurs composants, leurs dimensions et leurs évolutions thermique, hydraulique et chimique, la partie utile et la tête d'alvéole, permettent de décrire l'évolution mécanique des alvéoles en deux composantes distinctes relatives à chacune de ces parties. En effet, mis à part les effets mécaniques indirects liés au dégagement de chaleur émis par les colis et le transfert d'hydrogène produit par corrosion dans la partie utile, il y a peu d'influence mécanique entre les deux parties d'une alvéole et leurs évolutions peuvent être considérées comme quasi indépendantes.

- La partie utile est caractérisée par la présence des composants métalliques (revêtement, chemisage, (sur)conteneur) et des matériaux argileux au sens large (argilites et argile gonflante de barrière ouvragée pour les alvéoles de combustibles usés). Le fluage des argilites, le gonflement de l'argile gonflante avec la resaturation, la perte des propriétés mécaniques des composants métalliques avec la corrosion et la génération de produits de corrosion expansifs sont les principaux éléments de son évolution mécanique.

- La tête d'alvéole est, quant à elle, caractérisée par la présence des matériaux argileux (argilites et argile gonflante du bouchon) et du massif d'appui en béton. Le fluage des argilites, le gonflement de l'argile gonflante avec la resaturation et la dégradation chimique du béton sont les principaux éléments de son évolution mécanique.

### 8.5.2 Les contextes thermique, hydraulique et chimique

Les chapitres 5, 6 et 7 permettent de dégager les éléments importants des évolutions thermique, hydraulique et chimique des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés (Figure 8.5.1 et Figure 8.5.2).

- Le champ de température lié à la charge thermique est rapidement uniforme dans l'alvéole et en champ proche (de quelques centaines à mille années). Les températures maximales ( $\leq 90$  °C) sont atteintes avant la resaturation complète de l'alvéole. La décroissance thermique s'amorce au cours de la phase de saturation de la barrière ouvragée et du bouchon en argile gonflante.
- L'évolution hydraulique est marquée par la production d'hydrogène de corrosion. Cette production ne retarde pas la saturation du bouchon d'alvéole et de la barrière ouvragée (des alvéoles de combustibles usés) jusqu'à des degrés de saturation de l'ordre de 97 % (atteints en une dizaine d'années environ pour le bouchon d'alvéole de déchets C et une centaine d'années environ pour le bouchon et la barrière ouvragée de l'alvéole de combustibles usés). L'état totalement saturé du bouchon et de la barrière ouvragée (de l'alvéole de combustibles usés) ( $S = 100$  %) n'est cependant atteint qu'au bout de 100 000 ans environ avec l'arrêt de production d'hydrogène.
- La pression d'hydrogène augmente dans l'alvéole jusqu'à atteindre 6 - 7 MPa dans les alvéoles de déchets C et 9 MPa dans les alvéoles de combustibles usés en raison d'un terme de production plus important vers 2 000 - 3 000 ans (cf. § 6.3).
- Les argilites et l'argile gonflante de bouchon et de barrière ouvragée ne subissent pas de transformations minéralogiques significatives. En particulier, les interactions avec le fer des composants métalliques restent localisées aux interfaces. Le bouchon en argile gonflante subit une perturbation alcaline par le massif d'appui en béton : l'extension de la zone fortement reminéralisée par les eaux cimentaires est faible par rapport à la longueur du bouchon. Au-delà de la zone reminéralisée, un front de pH basique s'étend plus profondément dans le bouchon, mais il n'atteint pas la partie utile de l'alvéole. Par conséquent, le bouchon d'alvéole et la barrière ouvragée conservent globalement leurs propriétés mécaniques dans le temps, et notamment leurs propriétés de gonflement.
- La corrosion des composants métalliques se développe progressivement sur une échelle de temps de plusieurs dizaines de milliers d'années. Comme cela sera vu plus loin dans le chapitre, elle a pour conséquence la perte progressive de la résistance des chemisage et revêtement, puis des (sur)conteneurs.

### 8.5.3 L'organisation temporelle de l'évolution mécanique des alvéoles

#### 8.5.3.1 La partie utile d'alvéole

Les chemisages des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés assurent la stabilité de l'alvéole en reprenant la charge imposée par le milieu géologique (couplée ou non à la pression de gonflement de la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés) *a minima* durant la phase pluriséculaire d'exploitation et de réversibilité du stockage. Le dimensionnement de leur épaisseur tient compte de la corrosion à cette échelle de temps.

De la même manière, afin de préserver l'étanchéité des surconteneurs de colis de déchets C et des conteneurs de combustibles usés sur des durées respectivement millénaire et décennaire, le

dimensionnement de leur épaisseur tient compte d'une épaisseur de réserve de corrosion qui s'ajoute à l'épaisseur nécessaire pour tenir les contraintes lithostatiques du milieu géologique.

Par conséquent, l'évolution mécanique de la partie utile est liée à la corrosion : il faut attendre que celle-ci ait atteint une certaine épaisseur des chemisage, revêtement et conteneurages pour que leur résistance mécanique soit affectée, entraînant déformation et rupture.

### 8.5.3.2 La tête d'alvéole

La dégradation chimique du massif d'appui en béton s'organise sur plusieurs centaines de milliers d'années, donc bien après l'atteinte de la saturation du bouchon d'argile gonflante et la mise à l'équilibre mécanique du bouchon avec les argilites.

On peut ainsi dégager différentes phases dans l'évolution mécanique de l'alvéole :

- pour la partie utile :
  - ✓ la phase avant la perte de la résistance mécanique du chemisage et du revêtement et, pour les alvéoles de combustibles usés, la saturation de la barrière ouvragée,
  - ✓ la phase après la rupture du chemisage et du revêtement et avant la perte de la résistance des conteneurages,
  - ✓ la phase après la rupture des conteneurages ;
- pour le bouchon d'alvéole :
  - ✓ la phase de saturation du bouchon d'argile gonflante,
  - ✓ la phase après saturation et au fur et à mesure de l'évolution des propriétés mécaniques du massif d'appui du fait de sa dégradation chimique.

La présentation de l'évolution mécanique des alvéoles est structurée suivant une logique quasi chronologique, en séparant la partie utile et la tête d'alvéole :

- la mise en charge thermomécanique dès la mise en place des colis et la mise en place du bouchon d'alvéole,
- les différentes phases évoquées ci-dessus.

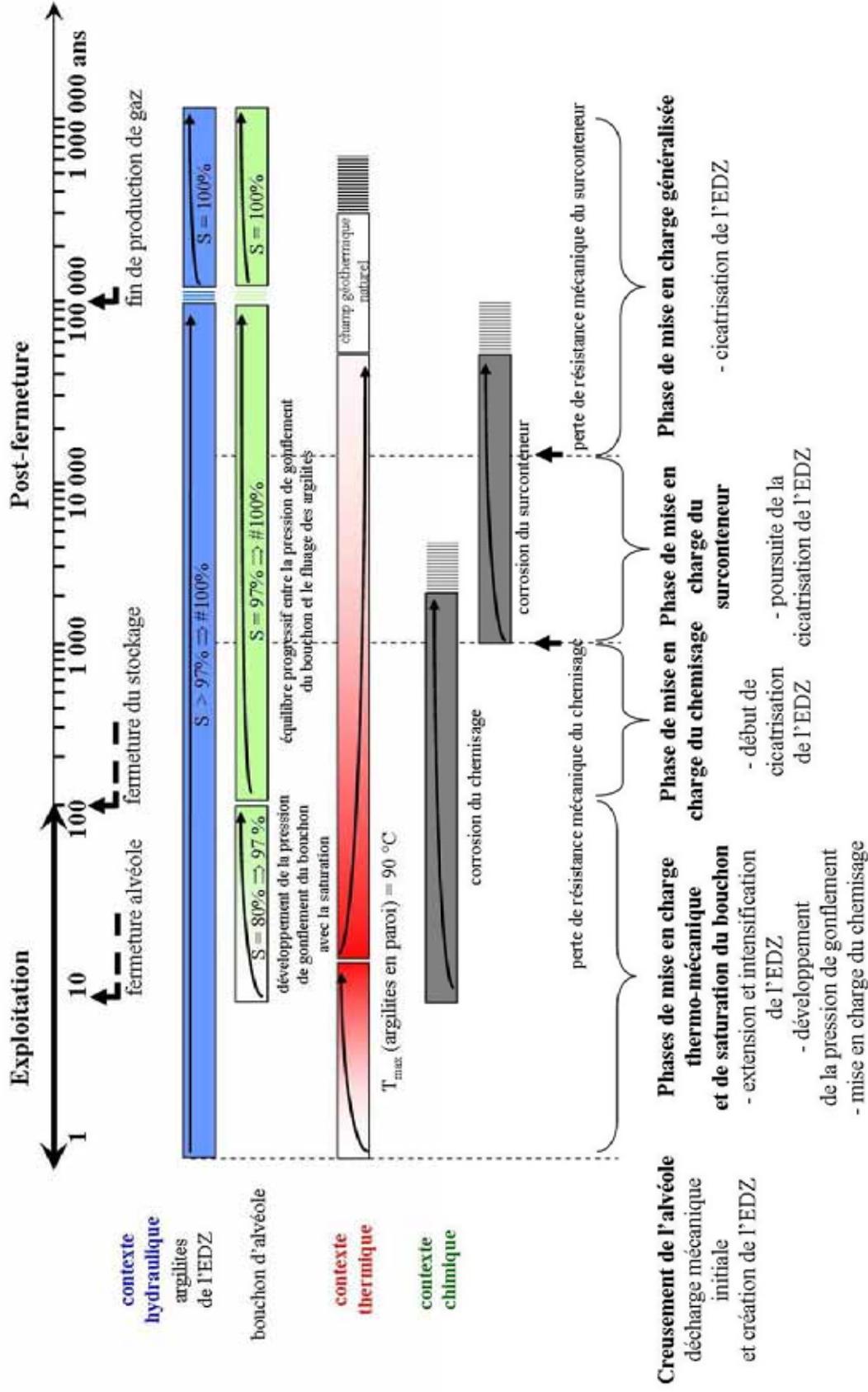


Figure 8.5.1 Chronogramme de l'évolution mécanique d'une alvéole de déchets C : contextes thermique, hydraulique et chimique en phase de réalisation, phase d'exploitation et phase de postfermeture (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage)

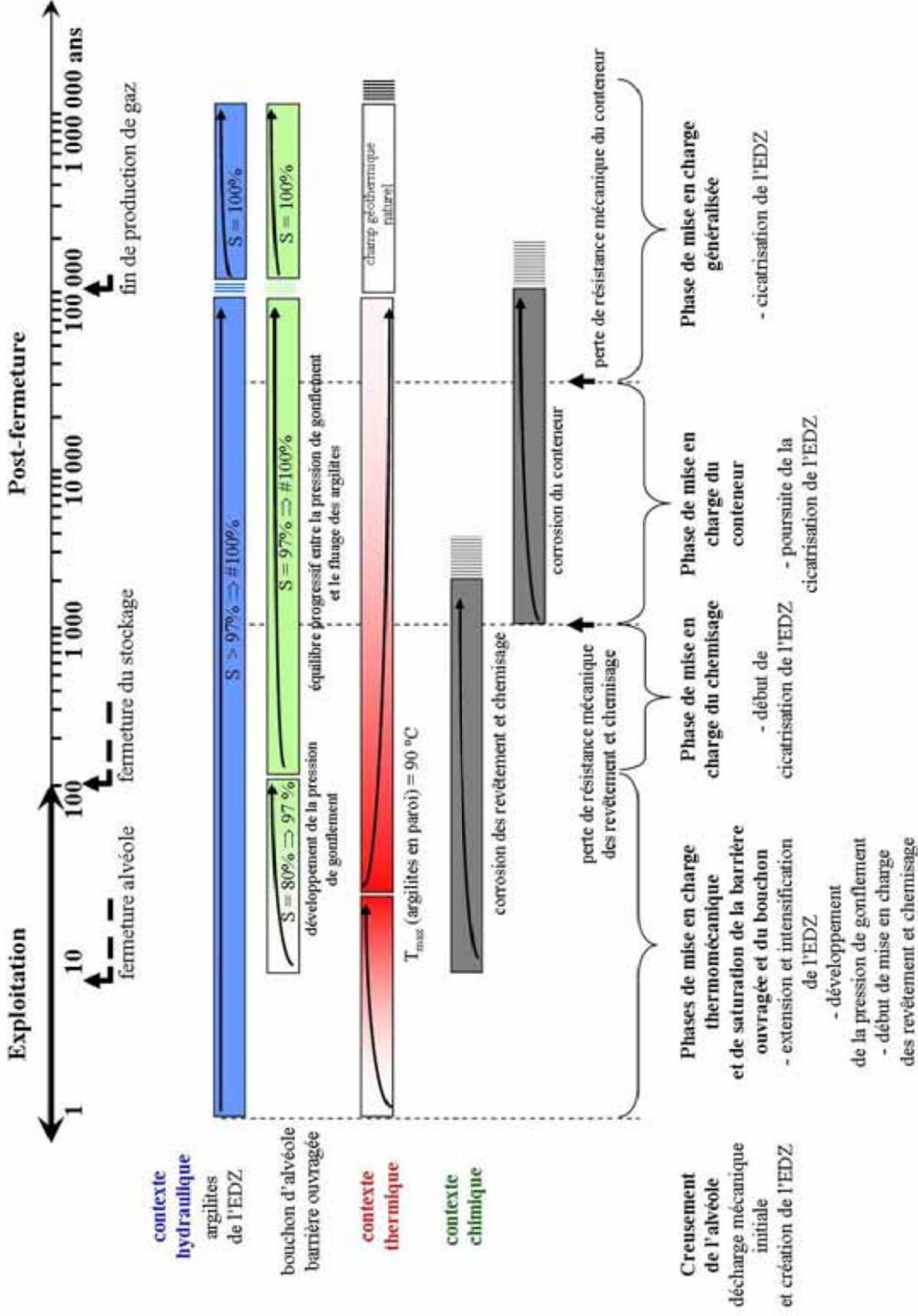


Figure 8.5.2 Chronogramme de l'évolution mécanique d'une alvéole de combustibles usés : contextes thermique, hydraulique et chimique en phase de réalisation, phase d'exploitation et phase de postfermeture (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage)

#### 8.5.4 La mise en charge thermomécanique du fait de la mise en place des colis et la mise en place du bouchon d'alvéole

Les colis mis en place dans l'alvéole induisent un échauffement au sein de l'alvéole et à son pourtour. La température des argilites (pour les alvéoles de déchets C) ou de la barrière ouvragée (pour les alvéoles de combustibles usés) à la paroi de l'alvéole augmente jusqu'à 90 °C dans les premières dizaines d'années et reste de l'ordre de 80 à 50 °C durant la phase d'exploitation (Figure 8.5.1 et Figure 8.5.2). L'élévation de la température a pour effet une accélération de la convergence des argilites et le développement de contraintes thermomécaniques au sein des argilites. Lors de l'augmentation de température, la dilatation thermique différentielle entre la matrice solide et l'eau interstitielle des argilites induit une surpression de pore. Pour une alvéole de déchets C, cette surpression est maximale depuis la paroi de l'alvéole sur quelques mètres, puis elle décroît progressivement. Sa valeur maximale de 4 MPa est atteinte vers dix ans environ. Pour une alvéole de combustibles usés, la surpression thermique maximale n'est pas en paroi de l'alvéole, mais à une distance de quelques mètres. Sa valeur maximale est identique à celle atteinte en paroi de l'alvéole de déchets C, soit 4 MPa (Su & Barnichon, 2005).

##### 8.5.4.1 La convergence des argilites

La convergence des argilites autour d'une alvéole de déchets C ou d'une alvéole de combustibles usés, amorcée dès la réalisation de l'alvéole (cf. § 8.2.4), est accentuée par l'élévation de la température consécutive à la mise en place des colis. Elle contribue à la réduction progressive des jeux fonctionnels entre le chemisage (alvéole de déchets C) ou le revêtement (alvéole de combustibles usés) et les argilites en paroi de l'alvéole. Au bout de quelques années, 40 à 60 % des jeux initiaux sont refermés, la convergence totale des argilites atteint alors 1,7 à 2,1 % (du rayon de l'excavation) (Su & Barnichon, 2005).

La vitesse de fluage des argilites se stabilise avec l'atteinte du paroxysme thermique. Au bout de 100 - 150 ans environ, les jeux entre les argilites et le chemisage (alvéole de déchets C) ou entre les argilites et le revêtement (alvéole de combustibles usés) sont comblés et la convergence cumulée des argilites atteint 2,8 à 3,3 % (Figure 8.5.3). Ces évaluations sont basées sur les valeurs maximales des jeux fonctionnels (1 à 2 cm) recommandées usuellement en génie minier. L'espace annulaire entre les argilites et le chemisage (pour l'alvéole de déchets C) ou entre les argilites et le revêtement (pour l'alvéole de combustibles usés) pourrait être réduit en fonction des conditions observées *in situ*, limitant ainsi l'extension de l'EDZ autour de l'alvéole.

##### 8.5.4.2 Le couplage thermomécanique et l'évolution de l'EDZ de la partie utile

Les mécanismes de fluage et de dilatation thermique induisent des déformations au sein des argilites qui sont à l'origine d'une accentuation et d'une propagation de l'EDZ autour des alvéoles (Figure 8.5.3).

- Sous l'effet des interactions thermomécaniques entre alvéoles voisines, l'EDZ augmente et devient légèrement anisotrope : au toit et au mur de l'alvéole, une zone fracturée (d'extension inférieure à 0,1 fois le rayon de l'alvéole) se développe et l'extension de la zone microfissurée augmente légèrement.
- L'EDZ évolue principalement sous l'effet des déformations différées associées au fluage des argilites et à l'élévation de la température. Dans l'hypothèse de jeux maximaux, les déformations des argilites atteignent 1,5 % quelques années après la mise en place des colis de stockage et culminent à 2,8 % aux piédroits et 3,3 % au toit et au mur de l'alvéole au bout de 100 - 150 ans environ avec la fermeture des jeux. Ces déformations sont supérieures au seuil d'endommagement (0,5 % en compression) et au seuil de rupture des argilites (1,5 % en compression - (Andra, 2005h, chapitre 25) - Encadré 8.2).

Pour une alvéole située à 500 m de profondeur, la combinaison de ces processus induit la création d'une zone fracturée d'une extension maximale égale à environ 0,4 fois le rayon de l'alvéole (soit environ 15 cm pour une alvéole de déchets C). La zone microfissurée progresse également jusqu'à atteindre une extension maximale d'environ 1,4 fois le rayon de l'alvéole (soit environ 50 cm pour une alvéole de déchets C). Les extensions des zones fracturée et microfissurée sont les plus importantes au toit et au mur de l'alvéole et minimales aux piédroits en raison des interactions thermiques entre alvéoles avoisines (Su & Barnichon, 2005), (Figure 8.5.5).

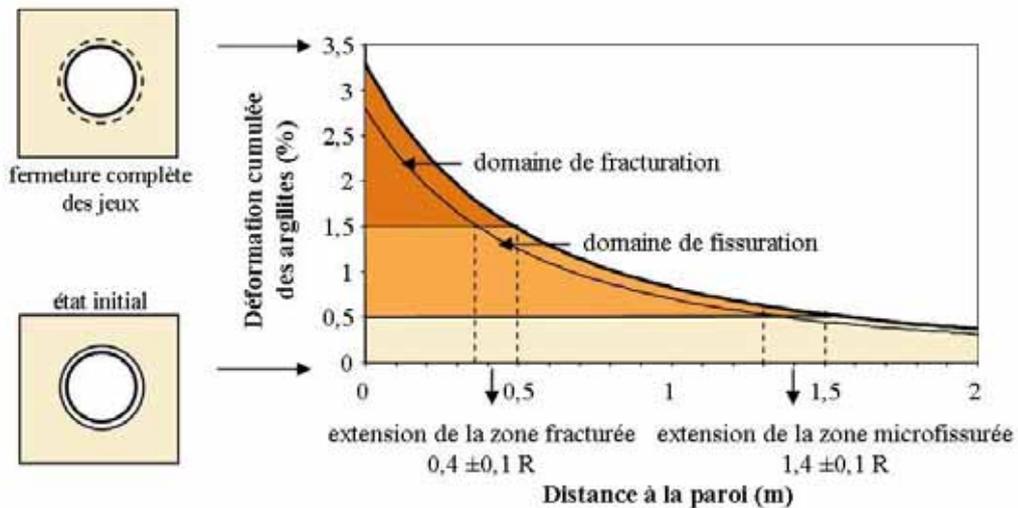
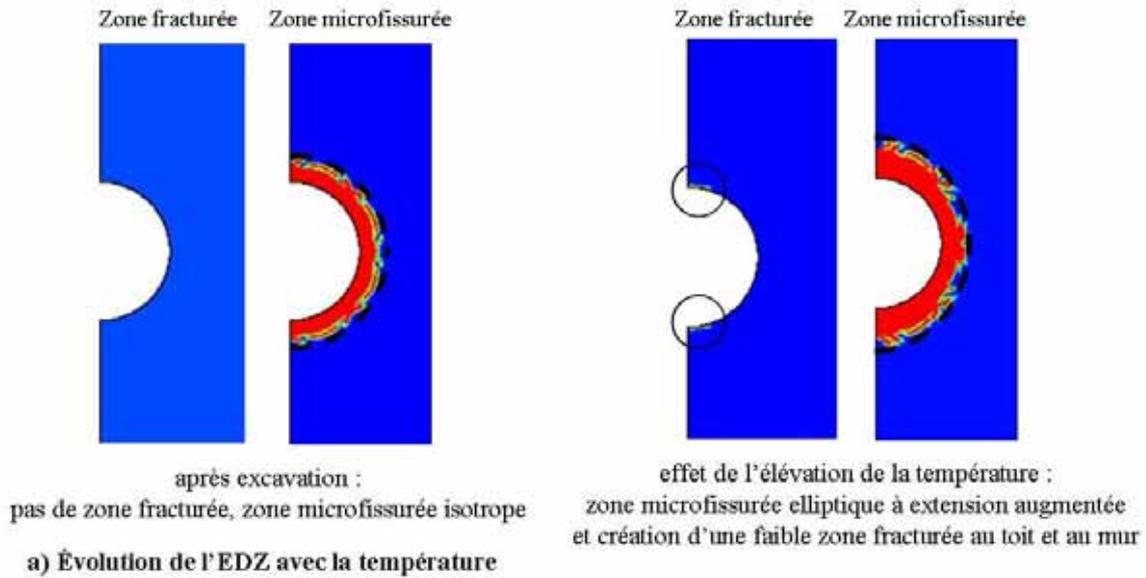


Figure 8.5.3 Évolution de l'EDZ autour d'une alvéole de déchets C sous l'effet de l'élévation de la température et de la convergence différée (hypothèse de jeux maximaux)

### 8.5.4.3 La mise en place du bouchon d'alvéole et l'évolution de l'EDZ au droit du bouchon

Dans l'*alvéole de combustibles usés*, le retrait du chemisage, la mise en place simultanée du bouchon d'argile gonflante puis du massif d'appui en béton est sans incidence supplémentaire sur le comportement mécanique des argilites en champ proche, compte tenu du maintien du revêtement (Su & Barnichon, 2005). L'évolution de l'EDZ est identique à celle de la partie utile (Figure 8.5.3).

Au droit du bouchon d'*alvéole de déchets C*, l'évolution de l'EDZ dépend du délai de mise en place de ce bouchon par rapport au temps nécessaire à la reprise des jeux fonctionnels entre les argilites et le chemisage. La mise en place rapide du bouchon limite ainsi la convergence des argilites, ainsi que l'évolution de l'EDZ sous l'effet (i) des interactions thermomécaniques entre alvéoles voisines (soit la création d'une petite zone fracturée et une légère extension de la zone microfissurée au toit et au mur des alvéoles) et (ii) des déformations différées des argilites. Le retrait préalable du chemisage pour la mise en place des bouchons d'argile gonflante et de béton n'entraîne pas de nouvelle décharge instantanée des argilites dans cette portion d'alvéole et reste sans impact supplémentaire sur l'EDZ. Après retrait du chemisage, le bouchon d'argile gonflante et le bouchon en béton sont en contact avec les argilites, ce qui empêche des déformations libres supplémentaires des argilites.

### 8.5.5 La saturation de l'argile gonflante du bouchon et de la barrière ouvragée (environ 100 ans)

La resaturation de l'argile gonflante du bouchon d'alvéole et de la barrière ouvragée (alvéole de combustibles usés) débute dès leur mise en place et se poursuit jusqu'à des degrés de saturation de l'ordre de 97 % sur cent années environ. Elle affecte d'abord la périphérie conduisant à la formation d'une pellicule d'argile gonflante saturée. Puis la saturation progresse de manière centripète au sein de l'argile gonflante, et permet la fermeture des jeux résiduels (argile gonflante/argilites pour l'alvéole de déchets C et argile gonflante/revêtement pour l'alvéole de combustibles usés) et le développement de la pression de gonflement (Figure 8.5.4).

À saturation, la pression de gonflement, inférieure à 7 MPa de par le choix de l'argile gonflante<sup>9</sup> (Andra, 2005i), Encadré 2.7), s'exerce radialement sur les argilites (au niveau du bouchon d'alvéole de déchets C) ou le chemisage et le revêtement (pour l'alvéole de combustibles usés) et axialement sur le bouchon métallique et sur le dispositif global de fermeture de l'alvéole. Ces derniers, n'étant pas dégradés à ce stade, maintiennent le bouchon d'argile gonflante confiné.

Au droit de la *partie utile de l'alvéole*, le jeu fonctionnel entre les colis de stockage et le chemisage non dégradé étant maintenu, les colis de déchets C ou de combustibles usés sont soumis uniquement à leur poids propre et à la dilatation thermique. Cette dernière ne suscite pas de contraintes thermo-mécaniques importantes compte tenu des jeux fonctionnels au sein de l'alvéole.

Au droit de la *tête d'alvéole de déchets C*, dès lors que l'argile gonflante est saturée, elle exerce une contrainte radiale sur les argilites qui a pour effet de ralentir leur convergence (diminution de la contrainte tangentielle). Ceci est favorable à une recompression des fissures de l'EDZ, plus ou moins parallèles à la paroi, et par conséquent, à une réduction de la perméabilité autour de la tête d'alvéole (Malama & Kulatilake, 2003). L'expérimentation Selfrac au Mont Terri, qui a consisté à soumettre les parois d'une galerie à une pression de quelques MPa représentative d'une pression de gonflement, a démontré la diminution de la perméabilité de 2 ordres de grandeur (Bühler *et al.*, 2003), (Figure 8.4.1). Le bouchon de béton, également en contact direct avec la roche, bloque la convergence des argilites. Il

<sup>9</sup> Le choix de l'argile gonflante repose sur la spécification d'une pression de gonflement n'excédant pas 7 MPa (en contrainte effective). Cette valeur est celle de la pression en équilibre avec les contraintes géostatiques radiales du site à 500 m de profondeur. Une pression de gonflement supérieure conduirait à solliciter inutilement les argilites ou les massifs d'appui des bouchons avant de revenir à ce niveau de 7 MPa. Une pression plus faible est même préférable de ce point de vue.

en résulte le développement d'une pression radiale sur les argilites qui est favorable à la recompression des fissures de l'EDZ (Figure 8.5.5), permettant ainsi une cicatrisation de cette EDZ, et en particulier l'effacement de l'endommagement supplémentaire lié aux déformations thermomécaniques.

Au droit de la *tête d'alvéole de combustibles usés*, le revêtement étant maintenu, le comportement des argilites est identique à celui de la section courante, hormis les effets de la température qui sont moindres (Figure 8.5.5).

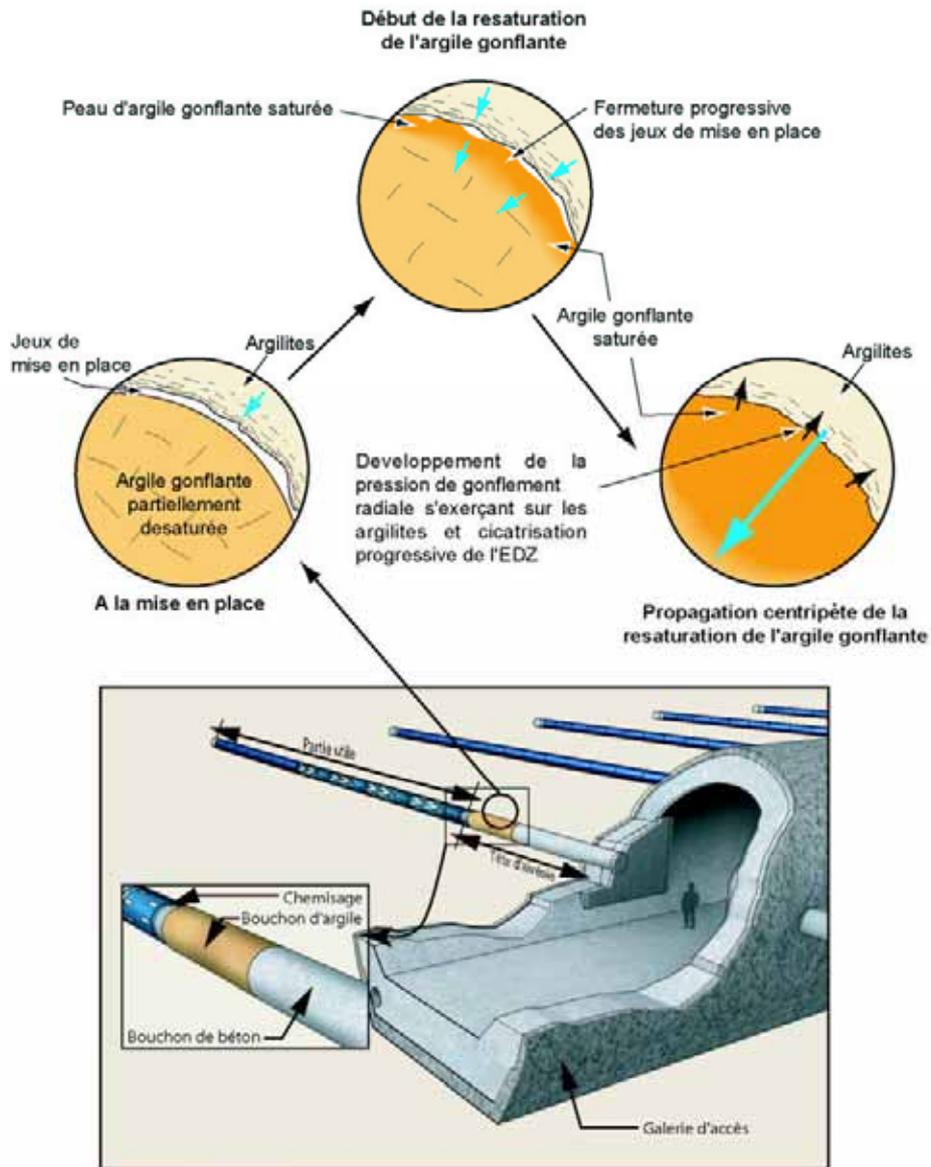


Figure 8.5.4 Processus de resaturation de l'argile gonflante : exemple du bouchon d'alvéole de déchets C

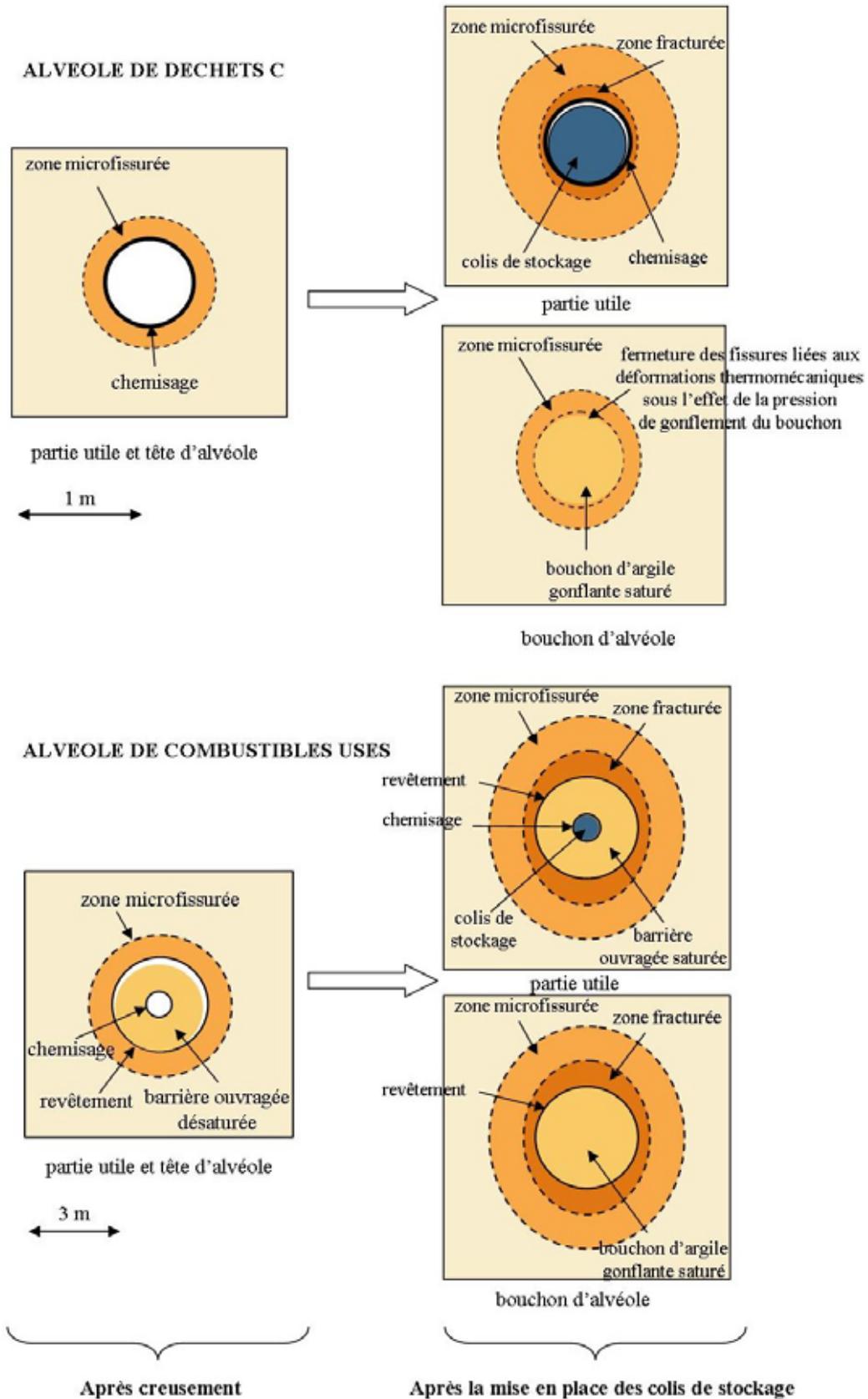


Figure 8.5.5 Schémas de l'évolution de l'EDZ autour d'une alvéole de déchets C et d'une alvéole de combustibles usés sous l'effet du couplage thermomécanique (échelle de temps de 100 - 150 ans)

## 8.5.6 L'évolution mécanique jusqu'à la rupture du chemisage et/ou du revêtement

### 8.5.6.1 En partie utile

Après la fermeture des jeux résiduels (chemisage/argilites de l'alvéole de déchets C et revêtement/argilites de l'alvéole de combustibles usés), le chemisage et le revêtement sont mis en charge sous l'effet du fluage des argilites, de la pression de gonflement de la barrière ouvragée (pour l'alvéole de combustibles usés) et des produits de corrosion expansifs du revêtement et du chemisage. La pression radiale sur le chemisage ou le revêtement augmente progressivement jusqu'à une pression de 12 MPa, correspondant à la contrainte lithostatique à 500 m de profondeur. Dans l'alvéole de déchets C, cette pression est atteinte vers 1 000 ans. Dans le cas de l'alvéole de combustibles usés où le revêtement est perforé, le cumul de la pression de gonflement de l'argile gonflante et le fluage des argilites accélère le retour à l'état de contrainte initial. Avec une pression de gonflement (effective) de 7 MPa, la pression exercée sur le revêtement et sur le chemisage est proche de 12 MPa au bout de quelques centaines d'années.

En outre, la corrosion du revêtement et du chemisage entraîne une perte progressive de leur section résistante. Le bilan de l'évolution de la mise en charge par les argilites combinée aux produits de corrosion et de l'évolution de l'épaisseur du revêtement et du chemisage n'est pas connu précisément à ce jour. Mais, compte tenu du dimensionnement de l'épaisseur du chemisage et du revêtement pour une charge radiale de 12 MPa et une réserve de corrosion de quelques millimètres, la rupture du revêtement et du chemisage est probable au-delà de 1 000 ans (cf. § 7.3.1).

Avant la rupture du revêtement ou du chemisage, sous l'effet conjugué de la contrainte radiale due au fluage et de l'expansion des produits de corrosion à l'extrados du revêtement ou du chemisage, les fissures de l'EDZ, orientées plus ou moins parallèlement aux parois des alvéoles, se ferment confinant ainsi l'EDZ et diminuant son extension et sa perméabilité (Malama & Kulatilake, 2003). Par analogie avec les résultats obtenus au Mont Terri (Bühler *et al.*, 2003), la réduction de la perméabilité est estimée à 2 à 3 ordres de grandeur. La perméabilité de la zone fracturée développée avec les déformations thermomécaniques durant le premier siècle (cf. § 8.5.4.2) évolue vers une perméabilité similaire à celle d'une zone microfissurée (Figure 8.5.6).

Pour l'alvéole de déchets C, l'effet de la pression liée aux produits de corrosion sur l'EDZ est susceptible de s'inverser si celle-ci augmente rapidement et dépasse la contrainte moyenne initiale régnant dans les argilites. En effet, dans cette hypothèse, la pression des produits de corrosion induit à plus long terme une fissuration par extension des argilites en paroi d'alvéole. Toutefois, compte tenu de la lente progression de la corrosion, le fluage des argilites devrait être suffisant pour contrecarrer les effets des produits de corrosion.

Pour l'alvéole de combustibles usés, le fluage des argilites et les produits de corrosion expansifs de la face interne du revêtement et de la face externe du chemisage entraînent une compaction de la barrière ouvragée saturée. Sa pression de gonflement augmente jusqu'à atteindre un équilibre avec l'état de contrainte externe (soit une pression de gonflement effective de 7 MPa pour un équilibre à 12 MPa). Les déformations de la barrière ouvragée empêchent ainsi une déformation des argilites allant jusqu'à la rupture ou l'endommagement (JNC, 2000). En outre, parallèlement à la lente compaction de la barrière ouvragée, sa porosité, et par conséquent sa perméabilité diminuent.

Le chemisage (de l'alvéole de déchets C et de l'alvéole de combustibles usés) conserve ainsi ses propriétés mécaniques durant environ 1 000 ans empêchant ainsi l'arrivée d'eau sur les (sur)conteneurs. Dans ces conditions, les colis de stockage ne subissent pas (ou peu) de dégradation chimique et conservent leurs propriétés mécaniques. Excepté le poids des colis sur le chemisage (en partie basse) et éventuellement, la charge induite par les produits de corrosion du chemisage, il n'y a pas d'interaction mécanique des colis de stockage avec les autres composants de l'alvéole. Le maintien

de jeux fonctionnels internes au chemisage et internes aux colis de stockage limite les contraintes thermomécaniques au cœur de l'alvéole.

### 8.5.6.2 En tête d'alvéole

Pour la *tête d'alvéole de déchets C*, l'argile gonflante du bouchon saturée se compacte sous l'effet de la mise en charge progressive par le fluage des argilites. La pression de gonflement de l'argile gonflante augmente jusqu'à atteindre sa valeur maximale (de 7 MPa) et la contrainte déviatorique au sein des argilites diminue. Un équilibre entre l'argile gonflante du bouchon d'alvéole et les argilites s'instaure. Il empêche ou limite graduellement la convergence des argilites. Ces processus contribuent au niveau du bouchon d'argile gonflante à la poursuite de la fermeture des fissures créées dans les argilites et au retour rapide à un état de contrainte à l'équilibre (de l'ordre de quelques centaines d'années) (Su & Barnichon, 2005). La perméabilité de l'EDZ autour du bouchon évolue progressivement vers la perméabilité des argilites saines (Figure 8.5.6).

Pour la *tête d'alvéole de combustibles usés*, de la même manière que pour la partie utile, l'argile gonflante de la barrière ouvragée se déforme sous l'effet du fluage des argilites et des produits de corrosion du revêtement. Un équilibrage permanent se met en place. Il empêche le développement supplémentaire de l'EDZ et favorise la fermeture des fissures de l'EDZ, d'où une diminution de la perméabilité des argilites au droit de la tête d'alvéole (Figure 8.5.6).

Le développement de la pression de gonflement dans le bouchon argileux se traduit également par la mise en charge axiale du massif d'appui en béton. Ce dernier conserve ses propriétés mécaniques sur plusieurs dizaines de milliers d'années assurant ainsi le confinement mécanique du bouchon d'argile gonflante sur ces périodes.

Le bouchon d'acier, placé entre la partie utile et la tête d'alvéole subit une dégradation par corrosion similaire à celle des autres composants métalliques de l'alvéole. De la même manière que pour les autres composants de l'alvéole, l'argile gonflante et les argilites reprennent les déformations qui en résultent.

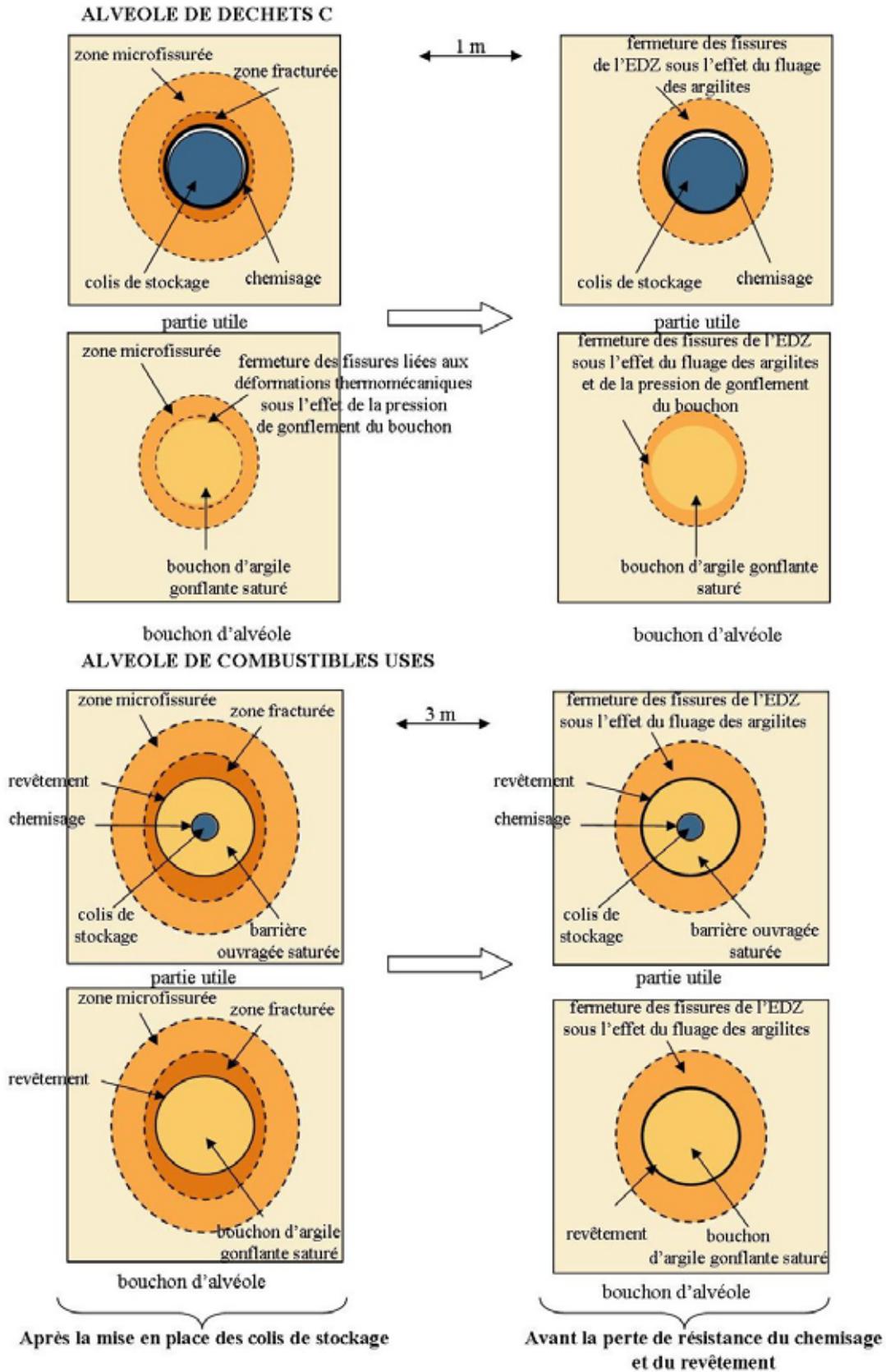


Figure 8.5.6 Schémas de l'évolution de l'EDZ autour d'une alvéole de déchets C et d'une alvéole de combustibles usés avant les ruptures du chemisage et du revêtement (échelle de temps pluriséculaire à millénaire)

### 8.5.7 L'évolution mécanique après la rupture des chemisage et revêtement et avant la rupture des (sur)conteneurs

#### 8.5.7.1 En partie utile

Au-delà de 1 000 ans environ, la mise en charge du revêtement et du chemisage, corollairement à leur corrosion, dépasse leur résistance mécanique (cf. § 7.3.1). La déformation du revêtement et du chemisage consécutive à leur perte de résistance résulte en une modification de l'état de contrainte (diminution de la contrainte radiale, augmentation de la contrainte tangentielle) par mobilisation des vides résiduels et un réarrangement mécanique progressif entre l'ensemble des composants de l'alvéole. Bien que la corrosion crée des produits expansifs qui remplissent les vides annulaires et exercent des contraintes mécaniques sur les autres composants de l'alvéole et sur les argilites à leur pourtour, des vides résiduels entre les colis de stockage et le chemisage peuvent subsister.

#### ● Les alvéoles de déchets C

L'augmentation du déviateur de contraintes consécutive à la déformation du chemisage et la présence de vides résiduels réactive le fluage des argilites. Toutefois, ces vides étant faibles, le déconfinement des argilites est modéré et une réactivation du fluage jusqu'à atteindre les seuils d'endommagement et de rupture est peu probable.

Les lentes déformations différées des argilites se poursuivent jusqu'au comblement total des vides et conduisent à la mise en charge progressive des surconteneurs. Il n'y a pas de réactivation de l'endommagement et au contraire, le fluage des argilites contribue à la poursuite de la fermeture des fissures résiduelles. L'extension et l'intensité de l'EDZ continuent à diminuer pour atteindre une perméabilité proche de la perméabilité des argilites saines (Figure 8.5.7).

Les sollicitations appliquées aux surconteneurs sont le poids des terrains sus-jacents, la pression de pore interstitielle, les contraintes thermiques résiduelles et les contraintes liées aux produits de corrosion expansifs. Ces sollicitations additionnées établissent à terme un équilibre correspondant aux contraintes lithostatiques du milieu géologique, soit 12 MPa.

Le dimensionnement de l'épaisseur du surconteneur repose sur une épaisseur utile de résistance vis-à-vis des contraintes susceptibles de s'exercer sur le surconteneur à une échelle de temps plurimillénaire et une épaisseur supplémentaire de perte de substance par corrosion sur cette même échelle de temps. Ainsi, bien que la corrosion du surconteneur s'amplifie avec la rupture du chemisage, celui-ci conserve une épaisseur suffisante pour résister à cette mise en charge jusqu'à la « consommation » totale de la surépaisseur de corrosion, soit au-delà de 15 000 ans (cf. § 7.3.1).

#### ● Les alvéoles de combustibles usés

Le revêtement est mis en charge par les argilites à l'extrados, et par l'argile gonflante de la barrière ouvragée à l'intrados et se corrode par ses deux faces. Par conséquent, celui-ci se déforme et perd sa résistance mécanique avant le chemisage.

Pendant une première phase, il y a un rééquilibrage permanent entre l'argile gonflante de la barrière ouvragée, les produits de corrosion expansifs du revêtement et de la face externe du chemisage et les argilites. L'argile gonflante pilote ce rééquilibrage : elle absorbe par déformation les contraintes liées aux produits de corrosion et limite les déformations en interne de l'alvéole (processus dit de type « convergence-confinement »). De fait, les argilites sont peu sollicitées et ces processus empêchent une déformation des argilites allant jusqu'à l'endommagement ou la rupture.

Ensuite, la mise en charge du chemisage et sa corrosion font que ce dernier perd ses caractéristiques mécaniques. Les conteneurs sont alors chargés directement par la pression de gonflement de l'argile gonflante de la barrière ouvragée. Dans un premier temps, celle-ci, par son potentiel de gonflement résiduel, absorbe progressivement les jeux fonctionnels qui subsistent entre le chemisage et les conteneurs. Puis, le même processus d'équilibrage entre l'argile gonflante de la barrière ouvragée, les produits de corrosion expansifs et le fluage des argilites que celui décrit ci-dessus se poursuit. Il conduit à la mise en charge progressive des conteneurs. La pression maximale exercée sur les conteneurs est estimée à 18 MPa. À terme, celle-ci s'équilibre avec la contrainte lithostatique du milieu géologique, soit 12 MPa. Le potentiel de gonflement de l'argile gonflante étant plus élevé que le potentiel de fluage des argilites, ce processus d'équilibrage est, de fait, plus rapide que pour une alvéole de déchets C (Figure 8.5.7).

En outre, la convergence différée des argilites et la compression de l'argile gonflante par les produits de corrosion induisent une compaction de la barrière ouvragée, et par conséquent sa porosité et sa perméabilité diminuent.

Les conteneurs de combustibles usés, d'une épaisseur initiale de 110 mm et 120 mm respectivement pour les combustibles usés de types CU1 et CU2, conservent une épaisseur suffisante pour résister à cette mise en charge jusqu'à 30 000 ans environ (après la « consommation » de l'épaisseur de corrosion – cf. § 7.3.1).

#### **8.5.7.2 En tête d'alvéole**

Au niveau du *bouchon de l'alvéole de déchets C*, compte tenu de l'absence de composants métalliques et de l'absence de modifications des propriétés mécaniques des argilites ou de l'argile gonflante, l'état de contraintes à l'équilibre atteint dès les premières centaines d'années est maintenu. Les fissures de l'EDZ autour du bouchon d'argile gonflante sont fermées et la perméabilité de l'EDZ peut être assimilée à celle des argilites saines (Figure 8.5.7).

Autour du *bouchon d'alvéole de combustibles usés*, l'évolution mécanique est similaire à celle décrite pour la partie utile de l'alvéole. Avec l'atteinte de l'équilibre de l'état de contraintes, la fermeture des fissures de l'EDZ se poursuit jusqu'à atteindre une perméabilité de l'EDZ équivalente à celle des argilites saines.

La dégradation chimique du bouchon de béton affecte en premier lieu sa périphérie, puis progresse vers son centre. Compte tenu du caractère lent et progressif de cette dégradation et de l'absence de vides, le fluage des argilites est suffisant pour reprendre les déformations qui résultent de la dégradation chimique sur la périphérie. Le bouchon de béton est mis en charge progressivement par les argilites sur la périphérie et par l'argile gonflante sur sa face interne et se rigidifie sous l'effet de ce « serrage ». Le remblai rigidifié de la galerie d'accès absorbe les déformations du massif d'appui sur sa face externe.

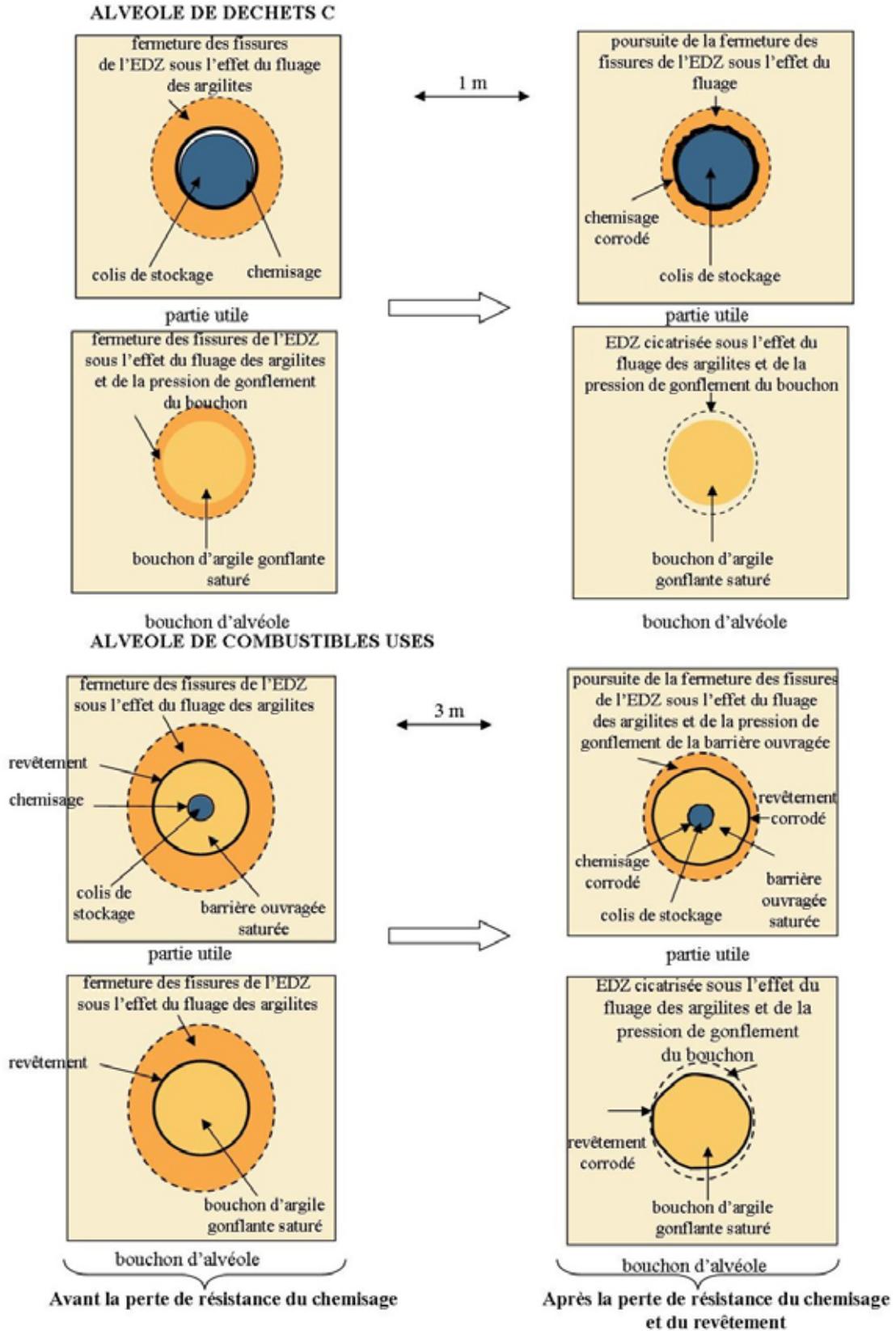


Figure 8.5.7 Schémas de l'évolution de l'EDZ autour d'une alvéole de déchets C et d'une alvéole de combustibles usés après la rupture du chemisage et avant la rupture du (sur)conteneur (échelle de temps millénaire à décennellaire)

### **8.5.8 L'évolution mécanique avec la corrosion des (sur)conteneurs**

D'un point de vue phénoménologique, la rupture des (sur)conteneurs par corrosion est envisageable vers 15 000 ans pour les colis de déchets C, vers 30 000 ans pour les colis de combustibles usés (cf. § 7.3.1), soit très au-delà des durées d'étanchéité de 4 000 ans et 10 000 ans respectivement pour les surconteneurs de déchets C et les conteneurs de combustibles usés).

De la même manière que lors de la rupture du revêtement ou du chemisage, la rupture des (sur)conteneurs résulte en une modification de l'état de contraintes (mobilisation des vides internes aux colis de stockage, diminution de la contrainte radiale, augmentation de la contrainte tangentielle) et un réarrangement mécanique progressif entre l'ensemble des composants de l'alvéole. Ces ajustements mécaniques locaux lents et progressifs entraînent une réactivation modérée du fluage des argilites, mais ne sont pas de nature à induire un endommagement des argilites. Les faibles déformations des argilites conduisent à un comblement progressif des vides résiduels et à une compaction des composants de l'alvéole jusqu'à atteindre un état d'équilibre avec une cicatrisation parallèle des fissures résiduelles de l'EDZ. La perméabilité de l'EDZ est proche de la perméabilité des argilites saines (Figure 8.5.8).

Au niveau des têtes d'alvéoles, le fluage des argilites permet l'accompagnement de la dégradation progressive des massifs d'appui qui conservent une résistance résiduelle sans créer de nouvelles perturbations dans les argilites. À terme, le massif d'appui, de la même manière que les autres composants des alvéoles, se densifie sous l'effet du fluage des argilites.

De façon généralisée, il y a ainsi une mise en charge des alvéoles par le milieu géologique avec une densification des composants des alvéoles et « intégration » mécanique dans le milieu géologique.

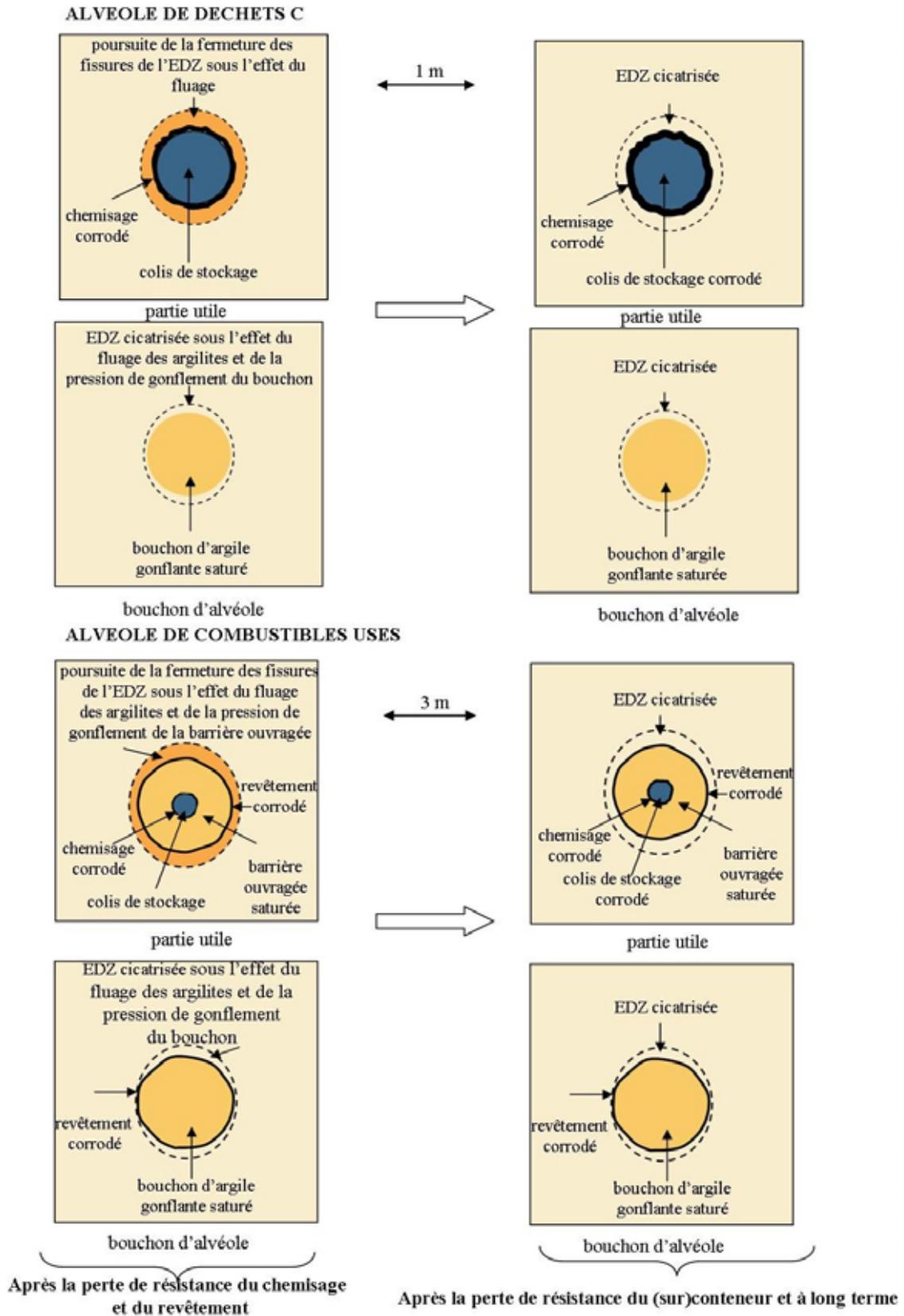


Figure 8.5.8 Schémas de l'évolution de l'EDZ autour d'une alvéole de déchets C et d'une alvéole de combustibles usés après la rupture du (sur)conteneur et à long terme (échelle de temps décennellaire)

## 8.6 L'évolution mécanique des scellements

La fermeture progressive du stockage correspond à la mise en place de scellements en des portions particulières de galeries, puis *in fine* dans les puits.

Les scellements ont en commun les points suivants :

- le principe retenu repose sur la combinaison d'un noyau en argile gonflante et de deux massifs d'appui ou de confinement en béton de part et d'autre de ce noyau. Des massifs de remblais granulaires permettent le maintien du confinement du noyau en argile gonflante au fur et à mesure de la dégradation des massifs de béton ;
- afin d'interrompre un éventuel chemin hydraulique préférentiel dans la zone fracturée (initiale ou consécutive à l'évolution mécanique lors de la phase d'exploitation), les éventuelles zones fracturées présentes dans les argilites sont supprimées par décapage lorsque cela est possible (cas des puits), ou interceptées par la création de saignées minces remplies d'argile gonflante, dites « coupures hydrauliques » (cas des galeries) ;
- la longueur des scellements est pluridécimétrique.

En revanche, les scellements se différencient par les points suivants :

- les galeries devant recevoir les scellements sont orientées selon la contrainte horizontale majeure. Leur section est donc soumise à un champ de contrainte initial isotrope favorable à une minimisation de l'EDZ lors du creusement (cf. § 8.2). Les scellements de puits étant verticaux, leur section est soumise à un champ de contrainte anisotrope ;
- les scellements de galeries sont globalement situés à la même profondeur et dans la « zone C » des argilites. Les scellements de puits sont situés à différentes profondeurs (et donc soumis à différents champs de contrainte) et dans des formations géologiques de nature différente. Il en résulte des extensions de l'EDZ moins importantes (notamment de la zone fracturée dans la « zone A » des argilites où sont implantés les scellements) qui conduisent à ne pas prévoir de coupure hydraulique dans les scellements de puits ;
- le décapage d'une éventuelle zone fracturée au niveau des scellements de puits suppose le retrait du soutènement/revêtement. La réalisation de coupures hydrauliques dans les scellements d'alvéoles de déchets B et de galeries permet le maintien du soutènement/revêtement.

### 8.6.1 La réalisation des scellements

#### 8.6.1.1 Les scellements d'alvéoles de déchets B et les scellements de galeries

La conception des scellements d'alvéole de déchets B et des scellements de galerie privilégie la limitation de l'endommagement des argilites. La disposition des portions de galeries recevant les scellements selon la contrainte horizontale majeure minimise l'EDZ initiale consécutive au creusement (cf. § 8.2). La dépose du soutènement/revêtement et un décapage par réalésage de la zone fracturée afin d'assurer un contact direct entre l'argile gonflante du scellement et les argilites est susceptible de propager l'endommagement autour des scellements et, de fait, n'a pas été retenue. La réalisation de coupures hydrauliques a été privilégiée afin de limiter l'endommagement et de réduire la perméabilité équivalente de l'EDZ autour des scellements en remplaçant les argilites fracturées par de l'argile gonflante, matériau moins perméable.

La forme et les dimensions de ces coupures hydrauliques, les distances entre ces coupures et leur mode de creusement sont définis de telle manière que leur réalisation n'entraîne pas la création d'une zone fracturée continue et qu'elles constituent effectivement une interruption de la zone fracturée à plus forte perméabilité autour de ces ouvrages. La réduction de la perméabilité axiale équivalente des argiles en paroi des scellements est évaluée à au moins un ordre de grandeur. La perméabilité de l'argile gonflante resaturée des saignées pilote cette perméabilité équivalente. Ainsi, avec l'hypothèse d'une perméabilité de l'argile gonflante de  $10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$ , la perméabilité équivalente autour des scellements est de  $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ . Les expérimentations menées dans les laboratoires de recherche souterrains étrangers ont montré qu'une perméabilité de l'argile gonflante de  $10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$ , voire  $10^{-12} \text{ m.s}^{-1}$  pouvait être obtenue (Chandler & *et al.*, 2002).

Cette spécification associée aux contraintes technologiques conduit au choix de saignées radiales de 30 cm d'épaisseur environ espacées de 8 m pour les scellements d'alvéole de déchets B et des galerie (Barnichon & Su, 2005b). La profondeur des saignées est telle qu'elle traverse l'éventuelle zone fracturée et atteint la zone microfissurée, donc de l'ordre de 1 à 3 m. La faisabilité technologique de la réalisation d'une saignée a été montrée au laboratoire du Mont Terri (essai EZ-A – (Barnichon & Su, 2005b) - Figure 8.6.1). Une expérience de même nature est réalisée dans le laboratoire de Meuse / Haute-Marne (essai KEY).

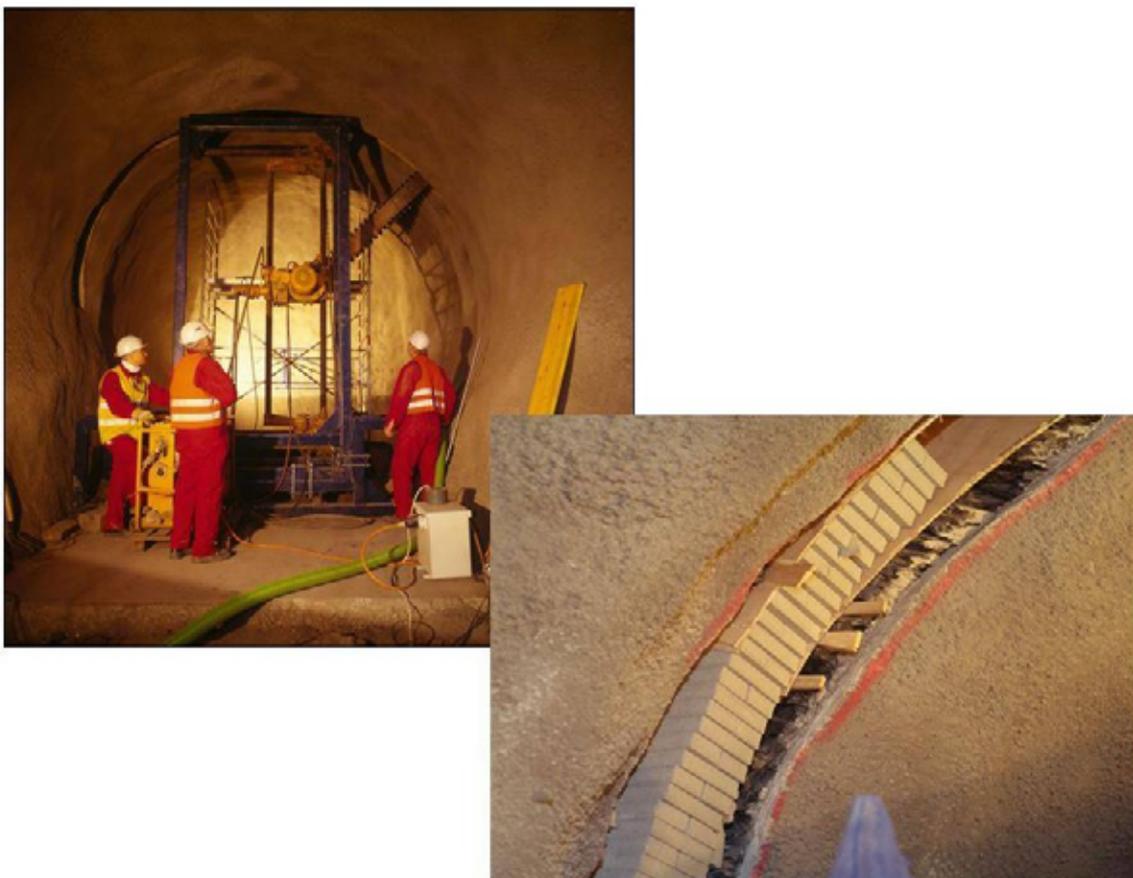


Figure 8.6.1 Photographies de la réalisation d'une saignée d'un scellement de galerie et de son remplissage avec des blocs d'argile gonflante compactée : essai de faisabilité au Mont Terri

Le soutènement/revêtement est maintenu de part et d'autre des saignées. Une portion de soutènement/revêtement de 1,30 m est déposée au droit de chaque saignée afin de disposer d'une distance de 50 cm de part et d'autre de la saignée séparant le béton de soutènement/revêtement et l'argile gonflante des saignées. Cette disposition permet de limiter la perturbation alcaline dans l'argile gonflante qui conserve ainsi sa capacité de gonflement (cf. § 7.5.1).

Les parois des saignées subissent la sollicitation mécanique liée au déconfinement de la contrainte longitudinale de l'ouvrage qui est aussi la contrainte horizontale majeure. Les effets en terme d'endommagement de cette nouvelle décharge sont modérés par l'amélioration des propriétés mécaniques des argilites par leur désaturation (Encadré 8.4). La réalisation des saignées entraîne toutefois la création d'une nouvelle EDZ de faible extension et de faible intensité. Une zone fracturée apparaît au raccordement entre la galerie et la saignée et au fond de la saignée. Celle-ci est discontinue le long de la saignée qui constitue effectivement une coupure hydraulique (Figure 8.6.2 et Figure 8.6.3) (Barnichon & Su, 2005b ; Ozanam & Su, 2003).

Les saignées sont ensuite remplies par assemblage de blocs d'argile gonflante compactée. Des injections de poudre d'argile gonflante permettent de remplir les interstices au besoin (Figure 8.6.1).

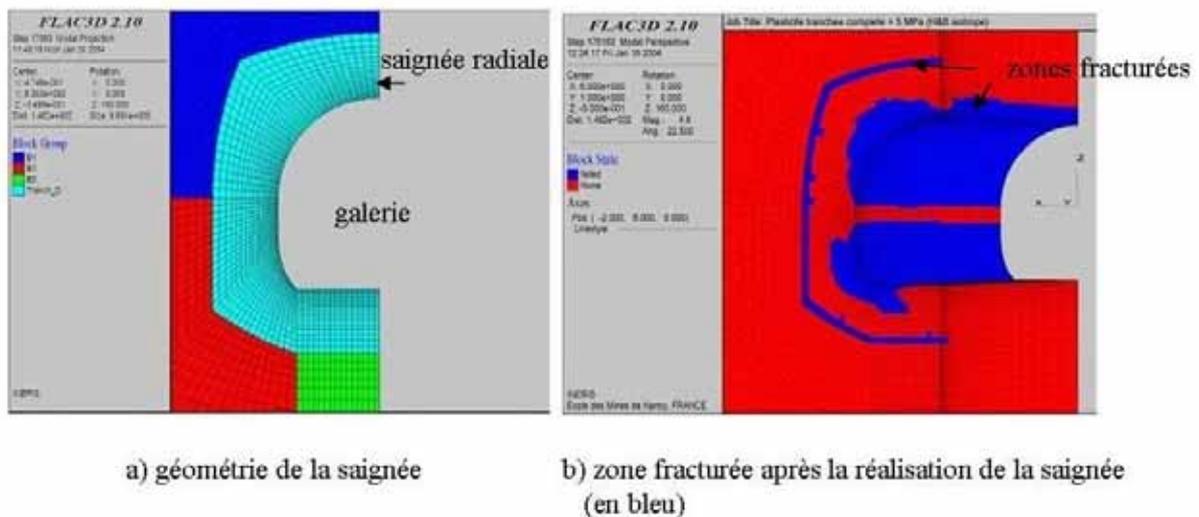


Figure 8.6.2 Modélisation numérique de la réalisation d'une saignée d'un scellement de galerie : interruption de la zone fracturée le long de la saignée

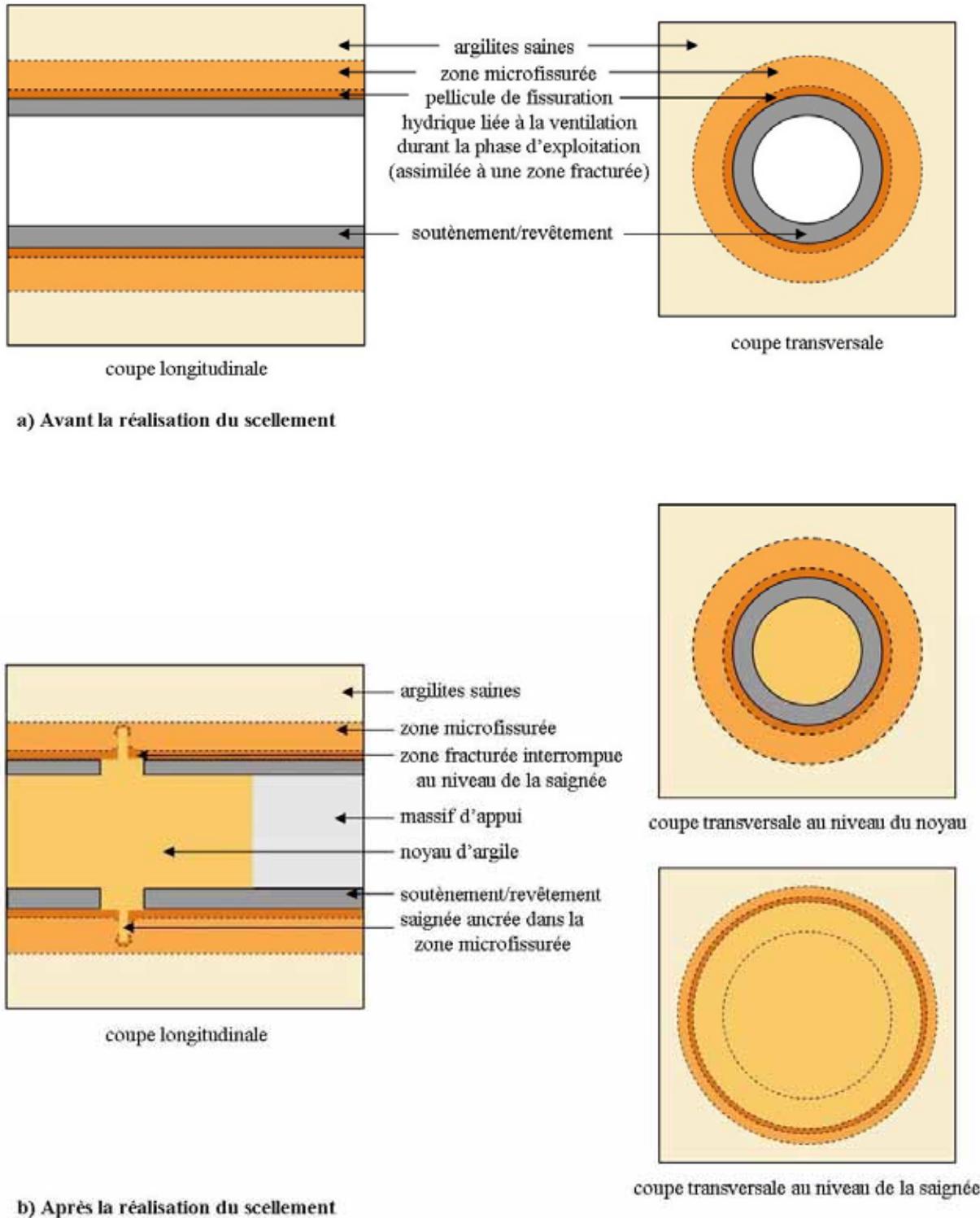


Figure 8.6.3 Schémas simplifiés illustrant l'interruption de la zone fracturée autour de la saignée d'un scellement de galerie

Le noyau de scellement, d'une longueur de 40 m environ, dont la fonction est d'assurer une performance de faible transmissivité est à base d'argile gonflante (Encadré 2.7). Afin de limiter la sollicitation des ouvrages d'appui de part et d'autre du noyau (massifs de béton et remblais), une pression de gonflement de 3 MPa est recherchée. Une mise en œuvre par assemblage de blocs précompactés d'un mélange d'argile gonflante et de sable (20 à 30 %) avec une densité sèche de

l'argile de 1,4 à 1,5 environ permet d'atteindre cette pression de gonflement de 3 MPa et de disposer d'une pression de gonflement résiduelle de 0,5 à 1 MPa après dégradation des massifs d'appui. Le recours à des blocs précompactés a été testé en vraie grandeur dans l'essai TSX mené dans le laboratoire de recherche souterrain canadien. Les vides périphériques ont été remplis de poudre d'argile gonflante afin d'améliorer le remplissage de la galerie et d'obtenir un noyau plus homogène (Chandler & *et al.*, 2002).

De part et d'autre du noyau d'argile gonflante, deux massifs en béton constituent un appui pour le confinement mécanique du noyau et le développement de sa pression de gonflement. Le choix d'un béton haute performance non armé, de faible perméabilité, permet de retarder sa dégradation chimique et d'éviter une fissuration par expansion des produits de corrosion.

Un remblai d'appui constitué d'un mélange d'argilites excavées (qui auront été stockées en surface en verse pendant l'exploitation du stockage) et de sable est mis en place derrière les massifs d'appui. Ce mélange permet d'obtenir un module de déformation de 20 MPa et un angle de frottement de 40° suffisants pour assurer une rigidité et un frottement qui permettent de limiter le déplacement du scellement après la dégradation chimique des massifs d'appui. La longueur du remblai d'appui est d'environ quatre fois le diamètre excavé afin de permettre au frottement entre le remblai et la paroi de la galerie d'équilibrer la pression de gonflement. Dans les alvéoles de déchets B, le massif d'appui et le remblai amont sont positionnés en tête de la galerie d'accès. Il est mis en forme par broyage et mélange, puis mis en place par compactage à l'optimum Proctor (à l'état non saturé) suivant des couches horizontales en partie inférieure, puis, en partie supérieure, en couches inclinées successives de manière à remplir l'ensemble du volume et à ne pas laisser des jeux de mise en place entre le remblai et la partie supérieure des galeries. À sa mise en place, le remblai n'a aucun rôle mécanique. Le confinement des argilites est assuré par le soutènement/revêtement.

#### 8.6.1.2 Les scellements des puits

La fermeture d'un puits comprend deux scellements et des remblais.

Un premier scellement, mis en place dans la partie supérieure de la couche du Callovo-Oxfordien (« zone A ») plus carbonatée que la « zone C » où sont situés les ouvrages de stockage, isole le stockage des formations géologiques sus-jacentes. Comme en galerie, son noyau est à base d'argile gonflante. Les évaluations de l'EDZ initiale dans la « zone A » ne prévoient pas de formation d'une zone fracturée lors du creusement (cf. § 8.2.3). Cette évaluation vaut également pour une dépose du soutènement/revêtement. Le nouveau déconfinement des argilites se fait avec un état de contraintes inférieur à l'état de contraintes initial lors du creusement des puits et n'entraîne pas d'endommagement supplémentaire des argilites. En outre, les propriétés mécaniques des argilites sont améliorées par leur désaturation. Dans ces conditions, le seuil de microfissuration n'est pas atteint. Le revêtement en béton est ainsi déposé sur toute la hauteur du scellement (environ 30 m) : l'argile gonflante du noyau est au contact direct des argilites. Une dépose du revêtement et un remblayage immédiat de la portion de puits par de l'argile gonflante par plots successifs limités en hauteur sont néanmoins envisagés afin d'assurer la sécurité du chantier. Une zone fracturée est susceptible de se développer en paroi des puits du fait de la désaturation des argilites durant la phase d'exploitation d'une part (essentiellement pour les puits de sortie d'air qui se désaturent davantage que les puits d'entrée d'air) (cf. § 8.3.2). Dans cette hypothèse, celle-ci sera retirée par décapage.

Le noyau repose sur un massif d'appui en béton mis en place dans les sections de puits au niveau des « zones B et C », puisards et recettes du puits et s'étendant dans les galeries qui s'y raccordent sur une longueur pluridécamétrique. Ces dispositions confèrent au massif d'appui une robustesse mécanique suffisante pour assurer la stabilité de l'ensemble des matériaux de fermeture sus-jacents mis en place dans les puits. Contrairement au scellement de galerie, le risque de relaxation du noyau avec la dégradation chimique du massif d'appui est écarté et une pression de gonflement de 7 MPa du noyau argileux, favorable à un retour vers un état d'équilibre, peut être visée. Un massif d'appui, ancré dans

l'Oxfordien carbonaté, est construit au-dessus du noyau afin d'assurer le confinement mécanique du noyau lors de la resaturation et du développement de la pression de gonflement.

De la même manière que pour les scellements d'alvéole de déchets B ou les scellements de galerie, le mode de mise en œuvre envisagé du noyau d'argile gonflante est un assemblage de blocs précompactés qui permet d'obtenir directement la densité nécessaire à l'obtention d'une pression de gonflement de 7 MPa (densité sèche de 1,8).

Les parties supérieures des puits (au niveau de l'Oxfordien carbonaté, des marnes du Kimméridgien et des Calcaires du Barrois) sont comblées par un remblai compacté.

Un second scellement à base d'argile gonflante compactée, similaire au scellement d'isolation du stockage, est mis en place afin d'assurer l'isolation des aquifères de l'Oxfordien carbonaté et du Kimméridgien (Figure 2.4.15).

## **8.6.2 Les contextes thermique, hydraulique et chimique de l'évolution mécanique des scellements après la fermeture**

Les chapitres 5, 6 et 7 permettent de dégager les éléments forts de l'évolution thermique, hydraulique et chimique des scellements (Figure 8.6.4).

### **8.6.2.1 Le contexte hydraulique**

La resaturation des scellements situés dans les argilites du Callovo-Oxfordien est déclenchée dès leur mise en place.

- Dans une première phase, la resaturation des saignées d'argile gonflante, du noyau argileux et des argilites autour des scellements n'est pas retardée par la production d'hydrogène de corrosion :
  - ✓ les saignées d'argile gonflante, de faible épaisseur et en contact direct avec les argilites sur leur périphérie, se saturent jusqu'à des degrés de saturation supérieurs à 97 % en quelques années ;
  - ✓ le noyau argileux et les argilites autour des scellements, y compris dans l'EDZ, atteignent ce même degré de saturation au bout de un à quelques milliers d'années.
- Ensuite, lorsque la pression de gaz augmente, puis atteint le seuil de pression permettant l'épanchement au-delà du scellement, le passage des gaz empêche la resaturation jusqu'à 100 %. La saturation totale est atteinte après l'arrêt de production de gaz, soit au-delà de 100 000 ans.
- Dans les remblais et les massifs d'appui, le passage des gaz empêche leur resaturation durant les premiers milliers d'années où la production de gaz au sein des alvéoles (notamment dans les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés) est importante. Les degrés de saturation des remblais restent proches de 70 %. Au-delà, la production de gaz diminue et les degrés de saturation des remblais et des massifs d'appui augmentent jusqu'à des valeurs supérieures à 90 %. La saturation totale n'est toutefois atteinte qu'après l'arrêt de production de gaz, soit après 100 000 ans.
- Les portions supérieures des puits, au dessus du scellement d'isolation du stockage, se resaturent rapidement par l'Oxfordien carbonaté sus-jacent. Ensuite, la perméabilité de l'argile gonflante pilote la resaturation complète du noyau argileux.
- La saturation du scellement d'isolation des aquifères au niveau des marnes du Kimméridgien dure quelques centaines d'années à un millier d'années.

### 8.6.2.2 Le contexte chimique

La dégradation chimique des composants des scellements (dégradation des bétons de revêtement et des massifs d'appui, perturbation alcaline de l'argile gonflante et des argilites,...) ne devient significative qu'avec la resaturation complète.

- Dans les argilites, la dégradation chimique des bétons de revêtement et des massifs d'appui avec une modification de leurs propriétés mécaniques ne devient significative qu'au-delà d'une période de 100 000 ans. Les propriétés mécaniques des bétons de revêtement et des massifs d'appui au niveau de l'Oxfordien carbonaté diminuent à partir quelques dizaines de milliers d'années.
- Seule une fraction de l'argile gonflante du noyau et des argilites, en contact avec le béton de revêtement ou des massifs d'appui, subit une perturbation alcaline limitée, sans entraîner une perte de leurs propriétés mécaniques et hydrauliques. En outre, le revêtement est retiré sur une distance de 50 cm de part et d'autre des saignées évitant ainsi l'alcalinisation de l'argile gonflante par le béton de revêtement. Enfin, les cintres étant situés à des distances de plus d'un mètre des saignées, leur corrosion n'entraîne aucune perturbation au niveau des saignées.

### 8.6.2.3 Le contexte thermique

La fermeture de ces ouvrages et l'arrêt de la ventilation s'accompagnent d'une lente élévation de la température au sein des scellements d'alvéole de déchets B exothermiques et des scellements de galerie des zones de stockage des déchets C et des zones de stockage des combustibles usés. La température atteinte dans ces ouvrages n'excède cependant pas 50 – 55 °C (cf. § 5) et les gradients thermiques restent faibles (inférieurs au degré Celsius par mètre). Les phénomènes mécaniques sont alors peu influencés par la charge thermique. En effet, les propriétés des composants de scellements, notamment les propriétés de gonflement de l'argile gonflante, ne sont pas modifiées par des élévations de la température de 30 – 35 °C (Chandler & *et al.*, 2002).

La zone des puits étant située à plusieurs centaines de mètres des zones de stockage, il n'y a pas d'élévation de la température liée à la mise en stockage de déchets exothermiques mais uniquement un retour à l'état d'équilibre des températures initiales suite à la fermeture des puits.

### 8.6.2.4 Bilan pour l'évolution mécanique

On peut ainsi distinguer deux grandes phases dans l'évolution mécanique des scellements :

- la phase de saturation. Elle a pour conséquence (i) le développement de la pression de gonflement de l'argile gonflante du noyau et des saignées (cas des galeries et des alvéoles de déchets B), (ii) la réactivation du fluage des argiles (argilites du Callovo-Oxfordien et marnes du Kimméridgien) et leur gonflement qui s'accompagne d'un début de cicatrisation des fissures de l'EDZ et (iii) la mise en charge progressive du soutènement/revêtement et des massifs d'appui. Durant cette période de quelques milliers d'années, les bétons subissent très peu de dégradation chimique et conservent leurs propriétés mécaniques intrinsèques ;
- dès lors que leur saturation est achevée, le scellement dans sa globalité est mis en charge par les argilites. Son évolution mécanique est alors principalement gouvernée par l'évolution différée des argilites et des argiles gonflantes avec la dégradation chimique des bétons (soutènement/revêtement, massifs d'appui).

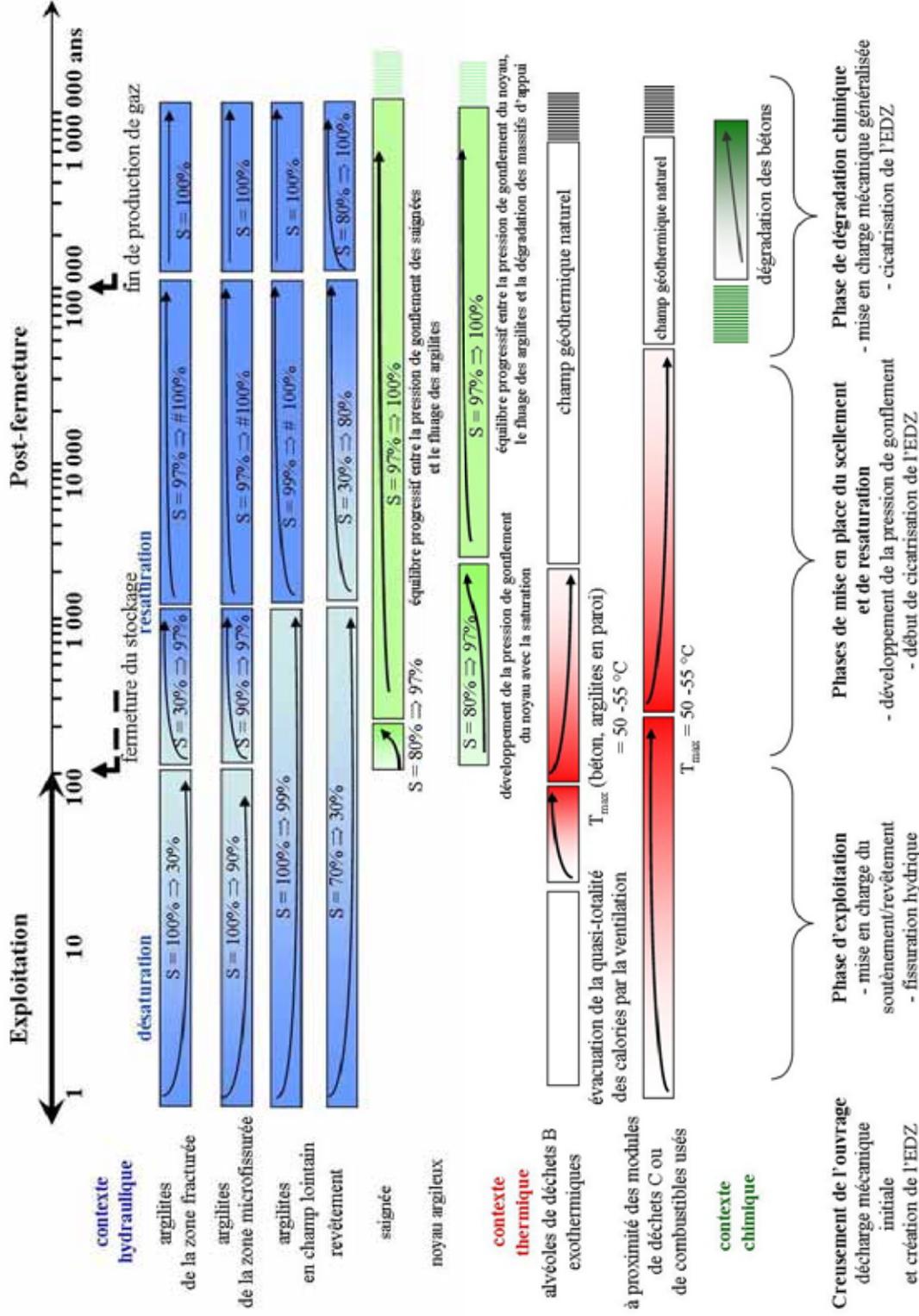


Figure 8.6.4 Chronogramme de l'évolution mécanique de galerie : contextes thermique, hydraulique et chimique en phase de réalisation et phase de postfermeture (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage)

### 8.6.3 La phase de saturation des scellements et le développement de la pression de gonflement

#### 8.6.3.1 Le noyau argileux et les saignées

L'argile gonflante du noyau argileux et des saignées est mise en place à l'état désaturé (degré de saturation de 80 %) à une densité sèche de 1,5 environ pour le scellement de galerie, de 1,8 pour le scellement de puits. Les pressions de gonflement maximales ainsi atteintes sont respectivement de 3 MPa et 7 MPa.

Dans le scellement de galerie ou d'alvéole de déchets B, l'état de saturation et la pression de gonflement développée par l'argile gonflante sont hétérogènes dans le temps et dans l'espace compte tenu des durées de resaturation très différentes entre les saignées et le noyau argileux.

La saturation des saignées et le développement de la pression de gonflement sont obtenus au bout de quelques années, donc bien avant celle du noyau argileux. Dans le noyau argileux, de la même manière que pour la barrière ouvragée d'une alvéole de combustibles usés, la saturation affecte d'abord la périphérie, puis progresse de manière centripète vers le cœur du noyau argileux et s'accompagne du développement de la pression de gonflement (Figure 8.5.4). La saturation différentielle entre les saignées et le cœur du noyau argileux peut engendrer des efforts de cisaillement à la base des saignées. Toutefois, la saturation de la pellicule externe du noyau argileux étant concomitante de la saturation des saignées, le comportement plastique de l'argile gonflante est suffisant pour absorber les déformations éventuelles et éviter l'apparition de dislocations au sein du noyau argileux. En outre, ces processus s'estompent, puis disparaissent avec la poursuite de la saturation du noyau argileux.

La pression de gonflement de l'argile gonflante saturée, dans le cas d'un scellement de puits et autour des saignées d'un scellement de galerie, s'applique directement sur les argilites. L'argile gonflante saturée interagit directement avec les argilites selon un processus (dit de « convergence-confinement ») similaire à celui décrit pour le bouchon d'argile d'une alvéole de déchets C (cf. § 8.5.5 - Figure 8.4.1) : le fluage des argilites, réactivé par la saturation, leur gonflement et le gonflement de l'argile gonflante réduisent le déviateur de contrainte dans les argilites et augmentent la contrainte normale aux parois. Ces processus conduisent à la fermeture progressive des fissures dans les argilites (Figure 8.6.5 et Figure 8.6.6, (Barnichon & Su, 2005b)). La diminution de la perméabilité des argilites qui en résulte est de 2 à 3 ordres de grandeur (Bühler *et al.*, 2003).

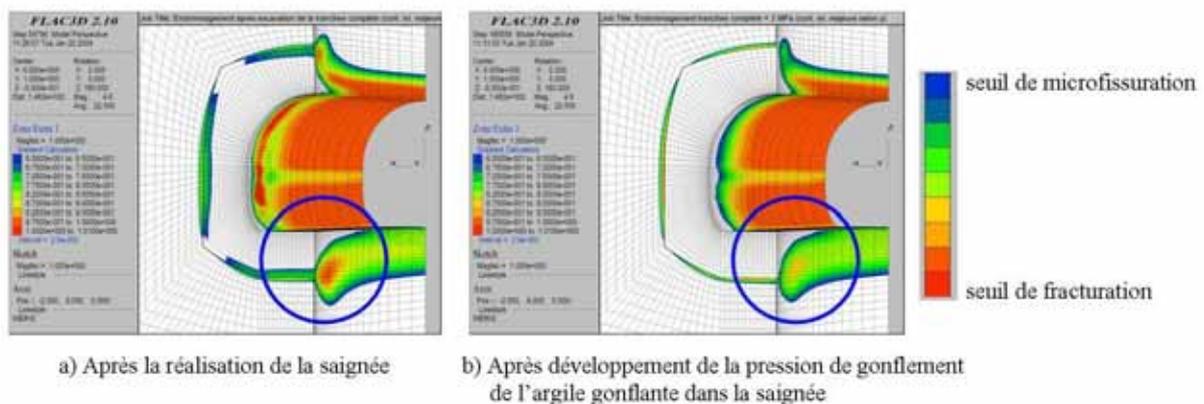


Figure 8.6.5 Modélisation numérique des effets de la pression de gonflement de l'argile gonflante dans la saignée d'un scellement de galerie sur les argilites en champ proche : recompression des fissures de l'EDZ initiale

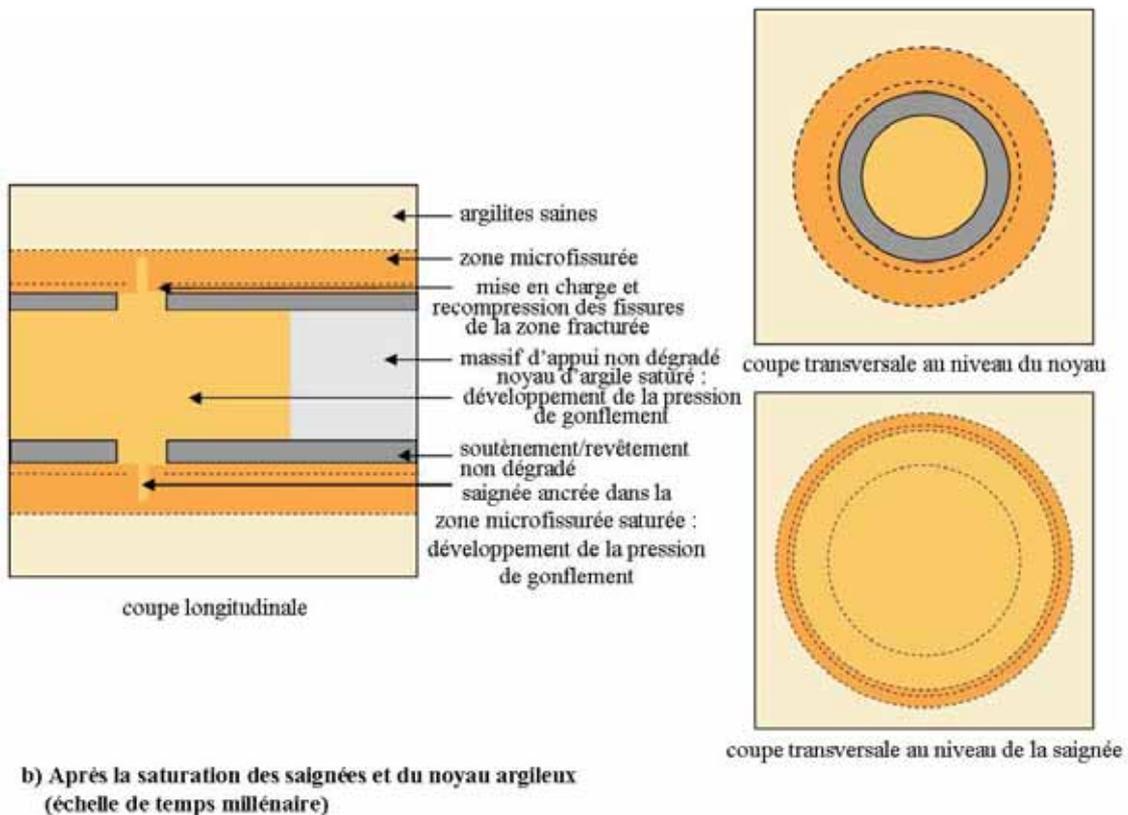
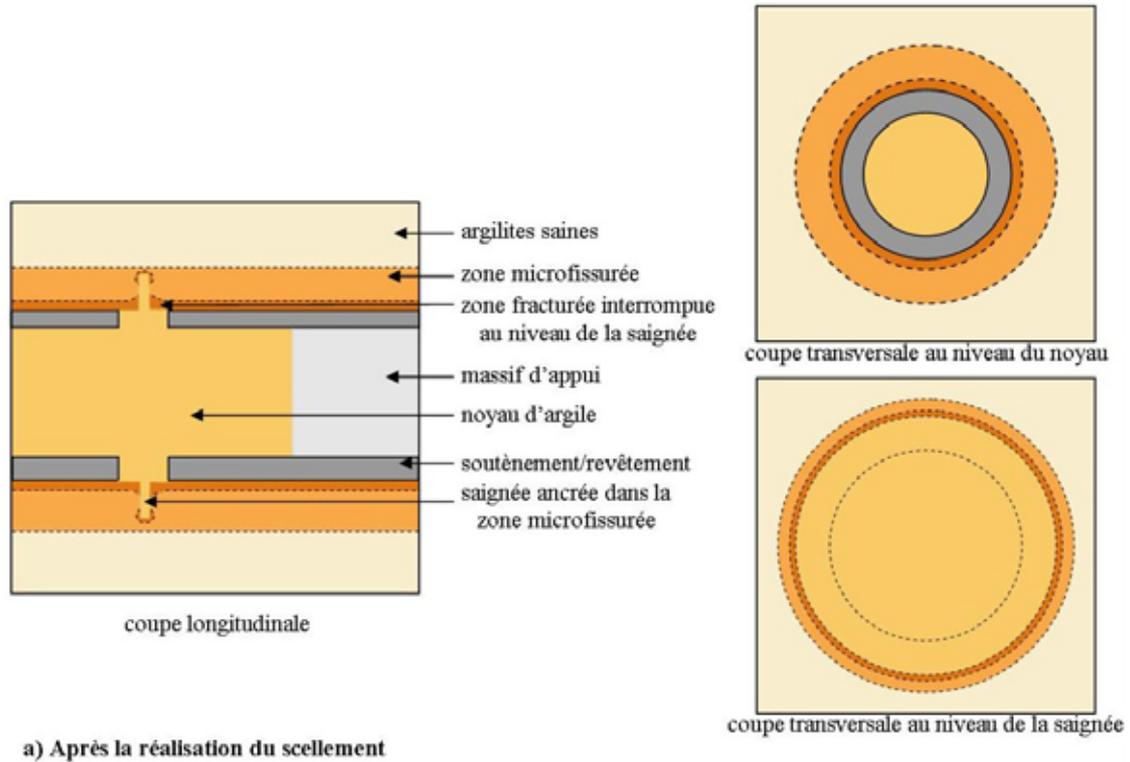


Figure 8.6.6 Schémas simplifiés illustrant la recompression des fissures de l'EDZ initiale sous l'effet de la pression de gonflement de l'argile gonflante et du fluage et du gonflement des argilites autour d'un scellement de galerie (échelle de temps millénaire)

### 8.6.3.2 Les massifs d'appui et les soutènements/revêtements

Concernant les massifs d'appui, la saturation centripète du noyau argileux s'accompagne d'une mise en charge hétérogène de leur face en contact avec le noyau argileux. Elle affecte d'abord la périphérie puis s'étend progressivement sur toute la surface de contact. Le dimensionnement et la conception de ces massifs d'appui tiennent compte de ces conditions de chargement hétérogènes notamment par l'ancrage dans l'intrados du revêtement maintenu. La durabilité des massifs d'appui est supérieure à la durée de resaturation complète du noyau argileux. Les massifs d'appui n'étant pas ou peu dégradés chimiquement, il n'y a pas d'effet « piston » du noyau argileux.

Les bétons de soutènement/revêtement des galeries, les massifs d'appui et les recettes de puits sont également mis en charge par les argilites sur leur face externe. Le fluage et le gonflement des argilites activés par la resaturation se traduisent par une pression radiale appliquée sur l'extrados des soutènements/revêtements, des massifs d'appui et des recettes de puits. De la même manière que pour les alvéoles de déchets B ou les galeries remblayées, ceux-ci n'étant pas dégradés chimiquement à ce stade, ils assurent le confinement mécanique des argilites et empêchent toute déformation libre. La pression de gonflement et la contrainte radiale résultant du fluage sont transmises aux fissures de l'EDZ, permettant la réduction de leur ouverture et par conséquent la diminution de la perméabilité des argilites en paroi des scellements (cf. § 8.4.2).

La mise en charge des bétons par le fluage et le gonflement des argilites conduit à des contraintes dans les soutènements/revêtements et, dans une moindre mesure, dans les massifs d'appui, supérieures à leur résistance au bout de quelques milliers d'années à 10 000 ans, donc bien avant que ceux-ci ne soient dégradés chimiquement. Des fissures sont alors susceptibles d'apparaître au sein des bétons, mais ceux-ci conservent néanmoins une résistance résiduelle. De plus, la totalité des vides internes aux ouvrages est comblée par de l'argile gonflante (noyau argileux) ou du remblai d'appui. Leur rigidité est suffisante pour maintenir le confinement des argilites à leur pourtour et empêcher des perturbations supplémentaires au sein des argilites. Dans les recettes de puits et les massifs d'appui, compte tenu de leur grande épaisseur (ils occupent la totalité de la section des ouvrages), les contraintes suscitées par les argilites sont inférieures à celles développées dans le revêtement et la rupture est alors atteinte plus tardivement.

### 8.6.4 Après resaturation, au fur et à mesure de l'évolution des propriétés mécaniques des massifs d'appui et des soutènements/revêtements

La dégradation chimique progressive des bétons de soutènement/revêtement, des massifs d'appui et des recettes de puits et le comportement différé des argilites pilotent l'évolution mécanique des scellements après la phase de resaturation.

#### 8.6.4.1 Le noyau argileux et les saignées

Dans le *noyau argileux*, les déformations qui résultent de la dégradation des bétons sont limitées en raison de l'absence de vides, du fluage des argilites et du comportement de l'argile gonflante resaturée. Progressivement, il y a un rééquilibrage permanent entre l'argile gonflante, le béton et les argilites. L'argile gonflante accommode ce rééquilibrage : elle absorbe par déformation les contraintes liées à la dégradation du béton et limite les déformations en interne du scellement. De fait, elle sollicite peu les argilites et empêche une déformation pouvant aller jusqu'à leur rupture ou leur endommagement.

Sous l'effet de la mise en charge par les argilites, les bétons de soutènement/revêtement et des massifs d'appui et le noyau argileux se densifient et les fissures résiduelles de l'EDZ se ferment. La contrainte déviatorique diminue, puis s'annule ; la contrainte moyenne augmente et il y a un retour progressif à l'état d'équilibre de l'état des contraintes et de la pression de pore. L'ouvrage est progressivement « intégré » mécaniquement dans le milieu géologique.

Au niveau des *saignées*, la fermeture des fissures de l'EDZ sous l'effet de l'équilibre entre le fluage des argilites et le gonflement de l'argile gonflante se poursuit. L'extension et la perméabilité de l'EDZ décroissent progressivement vers la perméabilité initiale des argilites.

#### 8.6.4.2 Les massifs d'appui et les soutènements/revêtements

Dans les massifs d'appui et les soutènements/revêtements, au niveau de l'interface entre le béton et les argilites, compte tenu du caractère lent et progressif de la dégradation chimique et de l'absence de vides, le fluage des argilites compense les déformations induites par la dégradation du béton. Au fur et à mesure de la dégradation des bétons, les contraintes de fluage et de gonflement des argilites sont transmises au noyau d'argile gonflante et au remblai d'une part, au béton de remplissage des massifs d'appui et des recettes d'autre part.

Il en résulte une légère réactivation de la convergence des argilites mais, compte tenu de l'absence de vides et du caractère lent et progressif de la dégradation, celle-ci n'induit pas d'extension supplémentaire de l'endommagement dans les argilites. Les déformations au sein des ouvrages réactivées par la dégradation des matériaux cimentaires deviennent faibles et s'accompagnent d'une diminution du déviateur de contrainte et d'une augmentation de la contrainte moyenne jusqu'à rétablir l'état de contrainte initial. L'ensemble des composants d'un scellement se densifie sous l'effet du chargement par le milieu géologique. Le fluage des argilites, et dans une moindre mesure le colmatage partiel de la porosité des argilites par leur alcalinisation au contact des bétons, permettent une recompression des fissures de l'EDZ.

À l'interface avec le noyau argileux, le potentiel de gonflement résiduel de l'argile gonflante compense la perte de rigidité du béton. La dégradation du béton à l'interface avec les argilites réduit néanmoins le frottement au niveau des ancrages des massifs d'appui et la charge du noyau argileux se transmet progressivement au remblai. Au fur et à mesure de ce transfert de charge, le remblai à l'arrière du massif d'appui (composé d'argilites et de sable) se densifie sous l'effet de la charge exercée par les argilites, acquiert une rigidité suffisante pour soutenir le massif d'appui et mobilise le frottement avec le revêtement restant et les argilites (Figure 8.6.7).

Dans les scellements de puits, le poids des remblais supérieurs se transmet progressivement au noyau argileux et peut provoquer des déplacements en cisaillement aux interfaces noyau argileux/roche et remblai/revêtement/roche. Les remblais étant mis en place à de fortes densités et sans vides résiduels, les tassements du remblai pendant sa saturation sont limités. Le comportement plastique de l'argile gonflante permet d'absorber ces déformations sans entraîner de désordres et donc modifier la perméabilité du noyau argileux. En outre, la saturation du remblai entraîne un léger gonflement des argilites constitutives du remblai et le développement d'une faible pression de gonflement (de l'ordre de 0,1 MPa, Barnichon & Su, 2005c). Celle-ci s'applique radialement sur le béton de soutènement/revêtement et axialement sur les massifs d'appui, et augmente le frottement entre le remblai et le soutènement/revêtement d'une part, entre les massifs d'appui et le remblai d'autre part.

Après la dégradation des bétons de soutènement/revêtement, des massifs d'appui et des recettes de puits, l'évolution mécanique des scellements est similaire à celle des autres ouvrages du stockage, à savoir une mise en charge généralisée par le milieu géologique. Cette mise en charge s'accompagne de la densification des composants des scellements qui à leur tour confinent les argilites. Il en résulte une diminution progressive du fluage accompagnée de la réduction du déviateur de contrainte et un retour à un état d'équilibre stationnaire avec la fermeture en parallèle des fissures résiduelles de l'EDZ.

Ainsi, de manière similaire aux ouvrages déjà traités ci-dessus, l'évolution de l'état de contrainte dans les scellements devient homogène et continue. À l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années, des réajustements liés à l'évolution du contexte géologique et à l'érosion peuvent avoir lieu. Ils interviennent alors de façon homogène sur l'ensemble des ouvrages du stockage (cf. § 8.7).

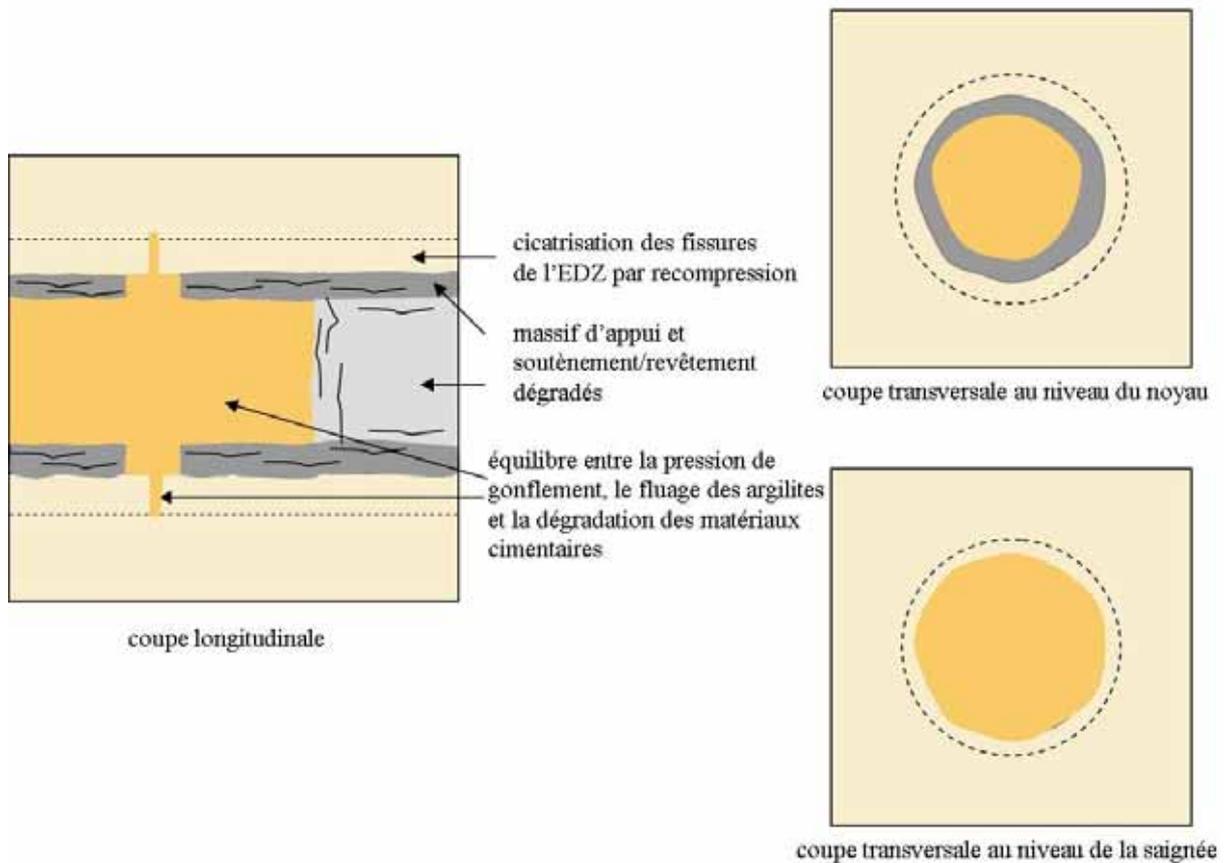


Figure 8.6.7 Schémas simplifiés illustrant la mise en charge généralisée d'un scellement de galerie au fur et à mesure de la dégradation du revêtement/soutènement en béton (au-delà de 100 000 ans)

### 8.6.5 Dans les formations sus-jacentes à la couche du Callovo-Oxfordien

Au droit des *niveaux calcaires*, la convergence des terrains et l'appui qui en résulte sur le revêtement dans un premier temps (tant que celui-ci n'est pas dégradé chimiquement), puis sur les remblais, est négligeable. Les remblais subissent uniquement le poids de la colonne de remblai supérieur. Mis en place avec une densité appropriée, leur tassement lors de la saturation reste limité et ne crée pas de vides significatifs. Le comportement différé de l'Oxfordien carbonaté étant négligeable, celui-ci se comporte de manière élastique et la dégradation progressive du béton de revêtement n'induit pas d'endommagement en paroi des puits.

À la hauteur des *marnes du Kimméridgien*, que les remblais soient saturés ou non par les eaux de l'Oxfordien carbonaté sous-jacent, la convergence ne dépasse pas quelques centimètres et la contrainte en résultant est absorbée par le soutènement/revêtement en béton et n'est pas transmise au remblai. Cette mise en charge s'accompagne de la poursuite de la fermeture progressive des fissures de l'EDZ. Au-delà de 100 000 ans, le béton de soutènement/revêtement se dégrade chimiquement et perd son rôle mécanique. Le fluage des marnes du Kimméridgien est alors réactivé. Mais, du fait de l'absence de vides, la création d'un endommagement supplémentaire en paroi des puits est peu probable. Dans la continuité de l'évolution mécanique au cours de la saturation, les phénomènes mécaniques se traduisent par un équilibrage des charges et une augmentation des frottements entre les différents constituants.

L'évolution mécanique des *scelllements d'isolation des aquifères* mis en place dans les niveaux peu perméables des formations de couverture afin de séparer les niveaux poreux aquifères est identique à celle décrite pour le scellement d'isolation du stockage mis en place dans le Callovo-Oxfordien.

## 8.7 L'évolution mécanique à grande échelle

À l'échelle du stockage et du site du stockage « en grand », l'évolution mécanique résulte de :

- la réalisation des ouvrages avec (i) l'excavation des volumes rocheux et l'introduction de matériaux exogènes au sein du milieu géologique, et d'autre part, (ii) les effets de la charge thermique induite par la mise en place de déchets exothermiques ;
- l'évolution du contexte géologique et les phénomènes d'érosion qui sont également susceptibles de donner lieu à des réajustements mécaniques au sein des ouvrages du stockage. Ceux-ci interviennent de manière homogène sur l'ensemble du stockage.

### 8.7.1 Les effets du stockage

#### 8.7.1.1 L'excavation des ouvrages et la modification de l'état des contraintes

La réalisation du stockage passe par l'excavation de volumes rocheux et une modification de l'état de contrainte au voisinage des ouvrages. La superficie du stockage est de l'ordre de grandeur de la dizaine de km<sup>2</sup>. Le volume excavé représente moins d'un pourcent du volume des argilites du Callovo-Oxfordien correspondant à la superficie du stockage (pour une épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien de 130 m).

En outre, au fur et à mesure de l'exploitation, puis de la fermeture du stockage, ces volumes excavés sont comblés par des matériaux proches du point de vue chimique du milieu géologique (remblai à base d'argilites excavées, argile gonflante). Par ailleurs, il a été vu dans le chapitre 7 que l'introduction d'autres matériaux (bétons, aciers) n'induisait que des perturbations chimiques limitées.

L'ensemble des opérations de fermeture vise à limiter au maximum les vides résiduels au sein des ouvrages. De plus, le choix des matériaux et leur mode de mise en place visent l'atteinte d'une densité de ces matériaux telle qu'une « intégration » mécanique des ouvrages dans le milieu géologique soit atteinte rapidement et permette un retour à un état homogène des contraintes (Su, 2005).

#### 8.7.1.2 La charge thermique

Les élévations de température dans les différentes formations géologiques consécutives au stockage ne sont pas de nature à induire des phénomènes mécaniques particuliers au sein de ces formations, autres que ceux décrits dans les paragraphes précédents.

L'endommagement thermomécanique reste limité au champ proche des alvéoles contenant les déchets les plus exothermiques et n'affecte pas la couche du Callovo-Oxfordien « en grand ».

### 8.7.2 Les effets de l'érosion et de la sismicité

#### 8.7.2.1 L'érosion en surface

Les phénomènes d'érosion s'accompagnent d'une décharge progressive des terrains, liée à la masse des terrains érodés. À l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années et sur l'emprise du stockage, le cumul des terrains érodés est limité (quelques dizaines de mètres au niveau des Calcaires du Barrois) et sans conséquence significative sur le poids global des terrains à 500 m de profondeur. En effet, cette variation se traduit par une diminution de la contrainte verticale de l'ordre de 0,5 MPa

et induit une légère anisotropie des contraintes dans la section des ouvrages. Cette anisotropie reste négligeable et sans effet sur l'évolution mécanique des ouvrages.

De la même manière, les légères modifications de contraintes dans la croûte provoquées par les réajustements isostatiques liés aux variations climatiques telles que les périodes glaciaires ne sont pas de nature à modifier sensiblement les caractéristiques morphologiques du site (Su, 2005).

### 8.7.2.2 Les séismes

Les phénomènes qui peuvent apparaître sous l'effet de séismes sont des sollicitations additionnelles dans les composants des ouvrages et par conséquent l'activation en différé de l'EDZ dans les argilites. La réponse des ouvrages de stockage aux sollicitations dynamiques dépend du taux de vides dans les ouvrages, de la nature des structures et de leur aptitude à reprendre des efforts de cisaillement supplémentaires et des interactions entre ouvrages (raccordements, agencement, densité).

Le site de Meuse / Haute-Marne se situe dans une zone de très faible aléa sismique (Brulhet, 2005a). La sismicité historique, considérée comme représentative de l'activité sismique durant la phase d'exploitation et d'observation du stockage permet l'estimation de séismes de référence durant cette phase (SMS de magnitude 6 à une distance focale de 25 km). Pour la période après fermeture du stockage, les séismes maximums physiquement possibles (SMPP) pris en compte sont liés aux failles proches du site et ont des magnitudes du même ordre que celles des zones actives lointaines (magnitude de  $6,1 \pm 0,4$  pour le système de failles de la Marne à 8 km).

Les études analytiques simplifiées considérant des ouvrages vides (configuration représentative de la phase d'exploitation) et une sollicitation sismique représentative de la sismicité du site de Meuse / Haute-Marne indiquent que la sensibilité à l'action sismique des ouvrages situés à 500 m de profondeur est très faible. Les effets dynamiques sont limités au-delà d'une profondeur de 300 m pour des gammes de fréquences des spectres des niveaux de séismes de types SMS et SMPP (en dessous de 15 Hz), quels que soient les types d'ondes et leur angle d'incidence. La fermeture des ouvrages diminue les contrastes d'impédance, et les effets d'une sollicitation sismique sont alors moindres par rapport à ceux des ouvrages vides. Ainsi, un risque de perturbation ne paraît possible qu'au niveau des puits d'accès au stockage, à moins de 300 m de profondeur, sans conséquence sur les ouvrages de stockage et notamment les scellements mis en place dans le Callovo-Oxfordien (Brulhet, 2005a).

Ainsi, en phase d'exploitation et d'observation du stockage et *a fortiori* en période de postfermeture, lorsque la totalité des ouvrages est remblayée, les ouvrages de stockage et les argilites en paroi ne sont pas ou peu affectés par d'éventuelles actions sismiques et une propagation de fissures autour des ouvrages sous des actions sismiques semble peu probable. En outre, à l'échelle du volume du stockage, le comportement d'ensemble attendu est celui du massif en place. Or, la couche du Callovo-Oxfordien dans son état actuel doit déjà avoir subi des séismes et ne sera pas plus affectée par les événements sismiques susceptibles de se produire dans le futur, à l'échelle du prochain million d'années. L'analyse des effets des variations climatiques et des effets de la sismicité suggère que ceux-ci ne sont pas susceptibles de modifier l'évolution mécanique des ouvrages du stockage.

## 8.8 Synthèse sur l'évolution mécanique du stockage et du milieu géologique environnant

Les évolutions thermique, hydraulique et chimique décrites dans les chapitres précédents définissent le cadre de l'évolution mécanique. L'évolution mécanique participe à l'évolution phénoménologique globale du stockage et de son environnement géologique.

Le chapitre sur le comportement mécanique a cherché à donner de l'évolution mécanique une image aussi précise que possible. Quelques faits marquants de l'évolution mécanique peuvent être dégagés, notamment vis-à-vis de la sûreté de réalisation et d'exploitation du stockage, des conditions de reprise des colis de déchets dans le cadre de la réversibilité et du devenir des radionucléides après leur relâchement. Les chronogrammes des évolutions mécaniques des principaux ouvrages du stockage sont résumés sur les Figure 8.3.1, Figure 8.5.1, Figure 8.5.2 et Figure 8.6.4.

### 8.8.1 Un impact mécanique du stockage limité au champ proche dans le Callovo-Oxfordien

L'évolution mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien « en grand » et des encaissants est limitée.

- Les changements climatiques attendus sur le million d'années et les processus géodynamiques internes (surrection et séismes) ne sont pas susceptibles de modifier significativement le champ de contrainte naturel en grand et de susciter des déformations généralisées dans le milieu géologique. Dans les zones soumises à l'érosion, la décharge progressive des terrains érodés diminue localement la contrainte verticale. Cette diminution est sans effet sur le comportement mécanique des formations géologiques, et plus particulièrement sur la couche du Callovo-Oxfordien et le stockage où elle est inférieure à 5 %.
- Les effets mécaniques du stockage sont circonscrits au Callovo-Oxfordien en champ proche à proximité immédiate des ouvrages. On retiendra en particulier les points suivants.
  - ✓ La conception compartimentée du stockage et les distances entre ouvrages limitent ou empêchent les interférences mécaniques entre ouvrages depuis les alvéoles de stockage jusqu'aux zones de stockage, notamment en terme de décharge mécanique lors de la réalisation des ouvrages.
  - ✓ Les effets de la décharge mécanique dans la couche du Callovo-Oxfordien autour des ouvrages du stockage sont limités à une zone de quelques mètres (EDZ), soit une épaisseur faible en comparaison de la garde d'épaisseur minimale de 60 mètres de Callovo-Oxfordien entre le stockage et l'Oxfordien carbonaté ou le Dogger.
  - ✓ Le stockage représente un volume faible comparé à celui correspondant à la superficie du stockage de la couche du Callovo-Oxfordien. Les ouvrages de stockage sont comblés de manière à limiter au maximum les vides. Les matériaux utilisés, comme l'argile gonflante par exemple, sont peu compressibles et/ou capables de s'opposer aux contraintes venant du milieu géologique. Ce remblaiement du stockage n'est pas affecté par les processus chimiques. Ceci évite des déformations en grand ou une fracturation de la couche du Callovo-Oxfordien et permet une « cicatrisation » mécanique du milieu géologique et le retour à un état de contrainte mécanique homogène.
  - ✓ La charge thermique du stockage se fait sentir dans les encaissants, mais d'une part sa durée est courte (quelques milliers d'années), et d'autre part les élévations de température sont homogènes dans l'espace et limitées à quelques degrés. La charge thermique n'est donc pas de nature à induire des phénomènes mécaniques significatifs.

- ✓ La charge thermique du stockage affecte principalement le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien. Toutefois, la cinétique de montée en température est lente et les gradients thermiques sont faibles au-delà de quelques décimètres à quelques mètres des alvéoles contenant des déchets exothermiques. À l'échelle de la couche du Callovo-Oxfordien, la charge thermique est donc relativement homogène. De ce fait, elle n'induit un champ de contraintes thermomécaniques qu'en champ proche des ouvrages et n'induit pas d'effet en « grand ».
- ✓ La désaturation des argilites du fait de l'air de la ventilation pendant l'exploitation du stockage, puis de l'hydrogène issu de la corrosion après fermeture du stockage reste limitée à l'EDZ. Ses conséquences mécaniques sont aussi limitées au champ proche du stockage.

### **8.8.2 L'absence de conséquence significative sur les évolutions hydraulique et chimique du milieu géologique**

L'évolution mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien et des encaissants, notamment le Dogger et l'Oxfordien carbonaté, n'est pas marquée par l'apparition d'une fracturation ou de déformations susceptibles de modifier localement ou en grand les écoulements et le transport des solutés, ainsi que la chimie des eaux interstitielles. Ceci contribue à maintenir les propriétés initiales de couche du Callovo-Oxfordien. En tant que phénomène mécanique, seule l'érosion due aux changements climatiques et à la géodynamique interne a un impact significatif sur les écoulements dans les encaissants, comme cela a été décrit dans le chapitre sur l'évolution hydraulique (cf. § 6).

### **8.8.3 Une évolution mécanique du stockage et du Callovo-Oxfordien en champ proche marquée par trois grandes périodes**

#### **8.8.3.1 À très court terme : le creusement du stockage et l'endommagement initial des argilites en champ proche**

La redistribution des contraintes et les déformations consécutives à la réalisation des ouvrages conduisent à la formation instantanée d'une zone endommagée (EDZ) des argilites à proximité immédiate des ouvrages de stockage. Cette EDZ initiale se caractérise par l'apparition de fissures plus ou moins connectées et dont la densité décroît avec l'éloignement à la paroi. Cette fissuration entraîne une augmentation de la perméabilité des argilites entre un ordre de grandeur à quelques ordres de grandeur par rapport à celle des argilites saines.

L'extension de l'EDZ dans les argilites du Callovo-Oxfordien a été évaluée par des modélisations numériques. Celles-ci, fondées sur des propriétés mécaniques minimales des argilites, donnent des estimations majorantes de l'extension de l'EDZ. L'extension ainsi évaluée est inférieure au rayon des différents ouvrages. Les premières observations et mesures réalisées dans le laboratoire de Meuse / Haute-Marne confirment à ce stade le caractère majorant de ces évaluations.

#### **8.8.3.2 Sur la centaine de milliers d'années : l'état non saturé du stockage et du Callovo-Oxfordien en champ proche lié à la ventilation puis à la production d'hydrogène de corrosion**

L'évolution hydraulique du stockage est marquée par une période d'état non saturé des ouvrages du fait de l'air de la ventilation pendant l'exploitation du stockage, puis de l'hydrogène issu de la corrosion après la fermeture des ouvrages et du stockage en général.

- Les alvéoles de déchets B, les galeries et les puits n'atteignent la saturation totale qu'au-delà de 200 000 ans environ. L'absence de saturation limite fortement la dégradation chimique des bétons de soutènement/revêtement par les eaux des argilites et conduit à un maintien des propriétés mécaniques des composants du stockage. Pendant la phase d'exploitation et d'observation du

stockage, la désaturation des argilites autour de ces ouvrages a pour effet un ralentissement, voire un blocage du fluage des argilites et par conséquent, une mise en charge limitée des soutènements/revêtements non dégradés chimiquement. La reprise du fluage des argilites avec leur resaturation progressive conduit à l'atteinte de contraintes au sein des soutènements/revêtements au-delà de leur résistance après quelques milliers d'années. Toutefois, compte tenu du caractère progressif de ce chargement et du faible taux de vides au sein des ouvrages, combinés à la dégradation chimique limitée de leurs composants, cela ne se traduit pas par une rupture brutale des ouvrages. L'évolution mécanique de ces ouvrages est progressive sans propagation ou intensification de l'EDZ.

- Dans les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés, les argilites au pourtour des alvéoles restent globalement saturées et la saturation de l'argile gonflante des bouchons et, le cas échéant, des barrières ouvragées, est atteinte au bout de 100 années environ. Le fluage des argilites et le gonflement de l'argile gonflante permettent la reprise des jeux fonctionnels dès la première centaine d'années. Cette fermeture des jeux s'accompagne d'une propagation transitoire de l'EDZ autour des alvéoles. Néanmoins, à l'échelle de quelques dizaines d'années à quelques centaines d'années, l'EDZ se cicatrise sous l'effet du fluage des argilites et de la pression de gonflement de l'argile gonflante (cas des bouchons d'alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés). Du fait de la persistance d'un état non saturé au cœur des alvéoles et de la lente progression de la corrosion des revêtements et des chemisages métalliques, les (sur)conteneurs de déchets ne subissent pas de contraintes mécaniques importantes avant une dizaine de milliers d'années.

### **8.8.3.3 Au-delà de la centaine de milliers d'années, sur le prochain million d'années : l'évolution chimique du stockage et le fluage en grand du Callovo-Oxfordien**

Après la saturation complète du stockage, l'évolution mécanique du stockage est pilotée par les processus lents de dégradation chimique des composants du stockage, le fluage des argilites et les propriétés de gonflement de l'argile gonflante.

La reprise du fluage des argilites avec leur resaturation, et dans une moindre mesure leur gonflement, « accompagnent » la dégradation chimique des bétons de soutènement/revêtement des alvéoles de déchets B et des galeries remblayées, puis des colis de stockage de déchets B. Compte tenu des faibles taux de vides dans ces ouvrages, les variations des contraintes au sein des argilites résultant de la dégradation chimique des bétons sont modérées. Le fluage des argilites réactivé par l'expression progressive des vides assure un retour à un état des contraintes en équilibre avec le milieu géologique.

Au sein des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés, le fluage des argilites, et le cas échéant, le potentiel de gonflement résiduel de l'argile gonflante des bouchons et de la barrière ouvragée permettent la reprise des vides créés par la dégradation chimique des revêtements, chemisages et (sur)conteneurs. De la même manière que pour les alvéoles de déchets B ou les galeries remblayées, les faibles vitesses d'évolution chimique des composants des alvéoles permettent aux processus mécaniques d'assurer un retour progressif vers un équilibre des contraintes.

De manière corollaire, l'intégration mécanique des ouvrages de scellement (bouchon d'alvéole, scellement de galerie et scellement de puits) au sein du milieu géologique résulte du cumul des faibles vitesses de dégradation chimique des bétons, du potentiel de gonflement préservé de l'argile gonflante et du fluage des argilites.

### **8.8.4 Éléments vis-à-vis de la réversibilité**

La sûreté de réalisation et d'exploitation du stockage est à la base du dimensionnement mécanique des ouvrages de stockage, comme par exemple la conception des soutènements et revêtements des puits et galeries. Il s'agit d'assurer la protection des travailleurs, non seulement envers les risques liés à la

dissémination de substances radioactives, mais également envers les risques d'une exploitation souterraine sur toute la période d'exploitation et d'observation du stockage.

Le dimensionnement mécanique et la conception du stockage en général intègrent également la capacité du stockage à offrir une liberté de choix dans la gestion des installations et des colis stockés. L'évolution mécanique des ouvrages de stockage, durant la période d'observation de l'état et de l'évolution du stockage, participe ainsi à la définition des conditions de reprise des colis de déchets.

Sur la durée de la phase d'exploitation et d'observation du stockage, d'ordre séculaire à pluriséculaire, l'état non saturé du stockage s'accompagne du ralentissement, voire de l'arrêt du fluage des argilites et de l'absence de dégradation chimique des composants des ouvrages. Il en résulte une évolution mécanique des ouvrages de stockage limitée : la stabilité mécanique des ouvrages et l'intégrité des colis de stockage sont conservées. Une exploitation du stockage sur plusieurs siècles dans le cadre d'un processus réversible n'a pas d'incidence sur l'évolution phénoménologique du stockage à long terme.

#### **8.8.4.1 Les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés**

L'intégrité mécanique des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés est assurée par la présence du revêtement et/ou du chemisage métalliques. Leur rupture et leur perte d'étanchéité n'interviennent qu'après la fermeture des jeux de mise place (d'ordre centimétrique) et leur perte de résistance par corrosion. Compte tenu de leur épaisseur, des faibles vitesses de fluage des argilites et des faibles vitesses de corrosion, une mise en charge des colis de stockage après la perte de résistance des revêtements et chemisages n'intervient qu'au-delà de 1 000 ans.

#### **8.8.4.2 Les alvéoles de déchets B, les galeries et les puits**

La mise en charge des soutènements/revêtements des alvéoles de déchets B, des galeries et des puits jusqu'à entraîner leur rupture s'effectue lentement. En effet, les faibles vitesses de fluage des argilites, les niveaux de température peu élevés et l'absence d'une dégradation cimentaire conduisent à un maintien des propriétés de confinement des soutènements/revêtements et par conséquent, une stabilité des ouvrages et une absence de mise en charge des colis de stockage de déchets B sur des durées à l'échelle du millier d'années et plus. En outre, ceux-ci ne subissent pas ou peu de dégradation chimique dans les conditions hydrauliques désaturées qui règnent au sein des alvéoles durant cette période.

#### **8.8.5 D'une évolution limitée de l'EDZ initiale à sa cicatrisation**

Le choix de matériaux de remplissage chimiquement compatibles avec le milieu géologique et leurs modes de mise en place avec une limitation maximale des vides résiduels au sein des ouvrages confèrent une stabilité mécanique globale aux différents ouvrages. Cela empêche une propagation et/ou une intensification de l'EDZ initiale.

- Durant la phase de non-saturation du stockage, notamment autour des alvéoles de déchets B, des galeries et des puits où les argilites se désaturent fortement, les processus chimiques et mécaniques tels que la dégradation des bétons et le fluage des argilites sont ralentis, voire bloqués. La désaturation résulte en un raidissement des argilites et peut entraîner une fissuration hydrique des argilites dans une pellicule de quelques décimètres autour des ouvrages. Avec la resaturation, l'effet du fluage et du gonflement des argilites est une cicatrisation de cette fissuration. La perturbation alcaline dans les argilites contribue également à la cicatrisation hydraulique de l'EDZ.
- Autour des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés, la fermeture des jeux de mise en place des revêtement et chemisage grâce au fluage des argilites, et dans une moindre mesure, l'élévation de la température durant les premières dizaines d'années après la mise en place

des colis de stockage dans les argilites entraînent des déformations des argilites conduisant à une augmentation transitoire de l'EDZ sur une durée limitée (100 à 150 ans). Au-delà de cette phase de fermeture des jeux de mise en place, le fluage des argilites, accéléré aux températures qui restent élevées, et la pression de gonflement de l'argile gonflante des barrières ouvragées et des bouchons d'alvéole permettent une fermeture progressive de cette fissuration. Après la fermeture des jeux de mise en place, l'EDZ autour des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés se cicatrise durant les premières dizaines d'années à premières centaines d'années.

- De la même manière, autour des ouvrages de scellements (bouchons d'alvéoles, scellements de galeries et scellements de puits), l'argile gonflante, qui conserve ses propriétés de gonflement, et le fluage des argilites assurent la cicatrisation de l'EDZ.
- Sur le long terme, l'extension de l'EDZ autour des différents ouvrages ne dépasse pas l'extension de l'EDZ initiale et la perméabilité y est augmentée de moins d'un ordre de grandeur par rapport à celle des argilites saines.

#### **8.8.6 Le maintien des propriétés hydrauliques des bouchons d'alvéoles et des scellements dans le temps**

Les bouchons d'alvéole, les scellements de galerie et les scellements de puits ont pour fonction la limitation du transfert des radionucléides par les ouvrages et leur champ proche.

L'évolution mécanique des bouchons d'alvéoles et des scellements se caractérise par une grande stabilité mécanique associée à une cicatrisation de l'EDZ autour de ces ouvrages. De plus, les saignées, disposition conceptuelle destinée à interrompre les zones de plus fortes perméabilités, contribuent à l'atteinte d'une perméabilité globale de ces ouvrages qui est augmentée approximativement d'un ordre de grandeur uniquement par rapport à la perméabilité des argilites saines.



# 9

## L'évolution géodynamique du Callovo-Oxfordien, des formations géologiques encaissantes et de l'environnement de surface

---

9.1	Introduction.....	407
9.2	La géodynamique interne.....	407
9.3	Les évolutions climatiques.....	408
9.4	Les conséquences des évolutions climatiques .....	414
9.5	Les modifications de la topographie.....	418
9.6	Les effets des évolutions sur les formations géologiques et les environnements de surface.....	421
9.7	Synthèse sur les évolutions géodynamiques des formations géologiques et des environnements de surface .....	425



## 9.1 Introduction

Les chapitres précédents (cf. § 5 à § 8) ont montré que les évolutions phénoménologiques liées au stockage ne concernent que le stockage lui-même et le milieu géologique en champ proche. Les temps caractéristiques de ces évolutions correspondent à des transitoires de quelques dizaines de milliers d'années à la centaine de milliers d'années au maximum.

Les temps caractéristiques des évolutions géodynamiques sont beaucoup plus longs : ils concernent des échelles de temps de la centaine de milliers d'années au million d'années voire au-delà. Leurs conséquences potentielles sont limitées aux formations proches de la surface. Ils modifient ainsi essentiellement l'hydraulique des formations encaissantes et par conséquent le transfert des radionucléides et des toxiques chimiques dans ces formations et leur retour vers la biosphère.

Ce chapitre aborde d'abord en détail les causes des évolutions géodynamiques : la géodynamique interne (mouvements du sous-sol, et notamment les mouvements verticaux, « moteurs » de l'érosion § 9.2) et la géodynamique externe (variation climatiques, § 9.3).

Les conséquences directes de cette évolution sont ensuite décrits, à l'échelle du secteur (Brulhet, 2005b) :

- ✓ la mise en place et le retrait, de manière cyclique, selon des périodes de l'ordre de la centaine de milliers d'années, d'un pergélisol, plus ou moins continu, associé à des modifications de l'environnement de surface (sols, flore et faune) (cf. § 9.4),
- ✓ une modification de la morphologie de surface sur le prochain million d'années (cf. § 9.5) selon un processus continu, résultant du couplage entre la géodynamique interne et externe.

Enfin, les effets de ces évolutions sur les différentes formations géologiques et sur l'environnement de surface sont présentés au § 9.6.

Une synthèse (cf. § 9.7) déclinera plus particulièrement ces effets vis-à-vis du transfert des radionucléides et toxiques chimiques.

## 9.2 La géodynamique interne

Les mouvements du sous-sol et l'état des contraintes naturelles qui s'y manifestent sont déterminés par la tectonique des plaques dont la cinétique est lente : la convergence actuelle entre la plaque européenne et la plaque africaine est estimée à quelques millimètres par an (Le Pichon, 2004).

La région a été peu déformée par les phases orogéniques alpines qui se sont succédées au cours des dernières dizaines de millions d'années (rejets de faible amplitude des failles régionales et acquisition de faibles pentes régionales). Les différentes données disponibles tant à l'échelle de la plaque ouest-européenne (Grellet *et al.*, 1993) qu'à l'échelle du secteur (Brulhet, 2005a) montrent que les contraintes tectoniques et les déformations engendrées ont très peu évolué depuis 5 Ma. Même si les mécanismes mis en jeu, tant mantelliques que crustaux, restent encore mal appréhendés, il ne subsiste guère d'incertitudes sur l'évolution probable du bâti géologique du secteur durant les prochaines centaines de milliers d'années. À cette échelle de temps, ce bâti reste tout à la fois à l'écart des zones volcaniques actives (localisées dans les provinces du Massif Central français et de l'Eifel (Brulhet, 2005a ; Brulhet, 2005b) et des zones actuellement soumises à des déformations tectoniques modérément actives qui l'encadrent (rift « ouest européen, bordure ardennaise, seuil morvano-vosgien) (Grellet *et al.*, 1993). Ainsi, le schéma actuel des contraintes et des déformations sur le secteur perdurera donc sur le prochain million d'années.

La vitesse de déformation, très lente à l'échelle du secteur, est appelée à le rester dans le futur. Les vitesses moyennes de déplacement sur les plans de failles sont estimées entre 0,0001 et 0,001 mm.an<sup>-1</sup> (Brulhet, 2005b). L'absence d'indices quaternaires d'activité tectonique sur les failles encadrant le secteur confirme que les mouvements tectoniques possibles sont limités à de très faibles rejeux de failles préexistantes et qui structurent le socle. Dans ce contexte, la possibilité de création de nouvelles failles dans la couverture, et a fortiori dans le Callovo-Oxfordien, est exclue dans la zone de transposition où de telles failles n'existent pas. Cette évaluation est confirmée par la stabilité de la zone au cours de toute l'histoire tertiaire et quaternaire, pourtant riche en événements tectoniques qui furent d'une amplitude plus importante que ceux attendus durant le prochain million d'années (distension oligocène et compression alpine notamment). Les séismes maximums possibles dans ce contexte montrent donc une magnitude modérée, de l'ordre de 6,1 +/- 0,4 sur les grandes failles encadrant le secteur, avec des périodes de retour comprises entre 100 000 et 1 000 000 ans (Brulhet, 2005a).

Les mouvements tectoniques verticaux résultant de la géodynamique interne déterminent, en association avec les variations du niveau des mers, l'évolution géomorphologique des régions continentalisées. De façon générale, cette évolution est contrôlée par des processus d'érosion, de sédimentation (comblement) ou d'altération en pénéplaine selon des mouvements relatifs respectivement de surrection, d'affaissement ou de stabilité.

Sur l'ensemble du Bassin Parisien, les observations réalisées et les analyses menées montrent une surrection tectonique présentant dans le détail une variabilité spatiale. Cette surrection serait plus marquée dans la partie sud-est du bassin où la morphologie de cuestas est particulièrement développée et culminerait sur sa bordure (zone de socle en relief marqué dans les Vosges et le Morvan) (Mégnién, 1980 ; Mercier & al., 2004). Les valeurs moyennes, calculées à partir des différentiels d'altitudes observées et des simulations des stades d'incision des rivières (position des paléoterrasses) (Brulhet, 2005b ; Leroux & Harmand, 1998), sont de l'ordre de 50 à 70 m.Ma<sup>-1</sup> dans le bassin, avec un minimum de 10 à 20 m.Ma<sup>-1</sup> dans la vallée de la Loire, et un maximum de l'ordre de 100 m.Ma<sup>-1</sup> sur la bordure sud-est (Vosges-Morvan). Ces données sont cohérentes avec des estimations plus globales mentionnées par ailleurs (surrection moyenne de l'ordre de 100 m.Ma<sup>-1</sup>) (Pomerol, 1978).

Dans ce cadre, le secteur de Meuse / Haute-Marne appartient à une région à laquelle peut être attribuée une vitesse de surrection moyenne uniforme de l'ordre de 80 m.Ma<sup>-1</sup>. Cette stabilité tectonique est illustrée, à l'échelle du secteur, par les différents témoins de l'érosion (paléosurfaces) qui se retrouvent tous à des altitudes comparables (Brulhet, 2005b ; Mégnién, 1980).

Dans le contexte tectonique défini ci-dessus, cette vitesse de surrection restera constante pendant les prochains millions d'années.

D'autre part, en phase de maximum glaciaire, les calottes s'avancent vers le sud, jusque sur l'Allemagne et le sud de l'Angleterre (voir ci-dessous § 9.3). Les mouvements isostatiques au droit des aires d'extension des calottes sont à l'origine d'un bourrelet de compensation qui affecte alors, de manière périodique, la zone du site. Les variations d'altitudes correspondantes, estimées par modélisation (Brulhet, 2005b), sont faibles (10 à 20 m) et s'appliquent à toute la partie nord de la France. Les conséquences, en terme d'érosion de ces mouvements périodiques, ne sont pas détectables et sont incluses dans les bilans d'érosion estimés par cycle climatique à partir des données terrain.

### 9.3 Les évolutions climatiques

Les changements qui ont affecté le climat de la terre durant le Quaternaire, soit depuis deux millions d'années, sont expliqués par la théorie astronomique des climats (Andersen & Borns, 1994 ; Berger, 1992 ; Joussaume, 1999) : des périodes glaciaires et interglaciaires se sont succédées, liées aux variations des paramètres orbitaux caractérisant la rotation de la terre autour du soleil. Les cycles ainsi

définis montrent des durées de l'ordre de 100 000 ans. L'événement marquant le plus récent de cette histoire est le dernier maximum glaciaire à  $18\,000 \pm 2\,000$  ans BP (Andra / CNF-INQUA, 1999). Ces cycles sont parfaitement illustrés par, entre autres, les analyses des carottes de glaces de l'antarctique permettant une vision des évolutions climatiques sur les 400 000 dernières années (Petit *et al.*, 1999) (Figure 9.3.1). L'extrapolation de cette théorie pour le futur conduit à faire, pour le site de Meuse / Haute-Marne, l'hypothèse d'une poursuite de ces cycles climatiques quaternaires, en l'absence d'une perturbation anthropique du climat (voir ci-après) et compte tenu de la faible vitesse des modifications des autres facteurs pouvant intervenir (tectonique des plaques, modification forte de la morphologie,...).

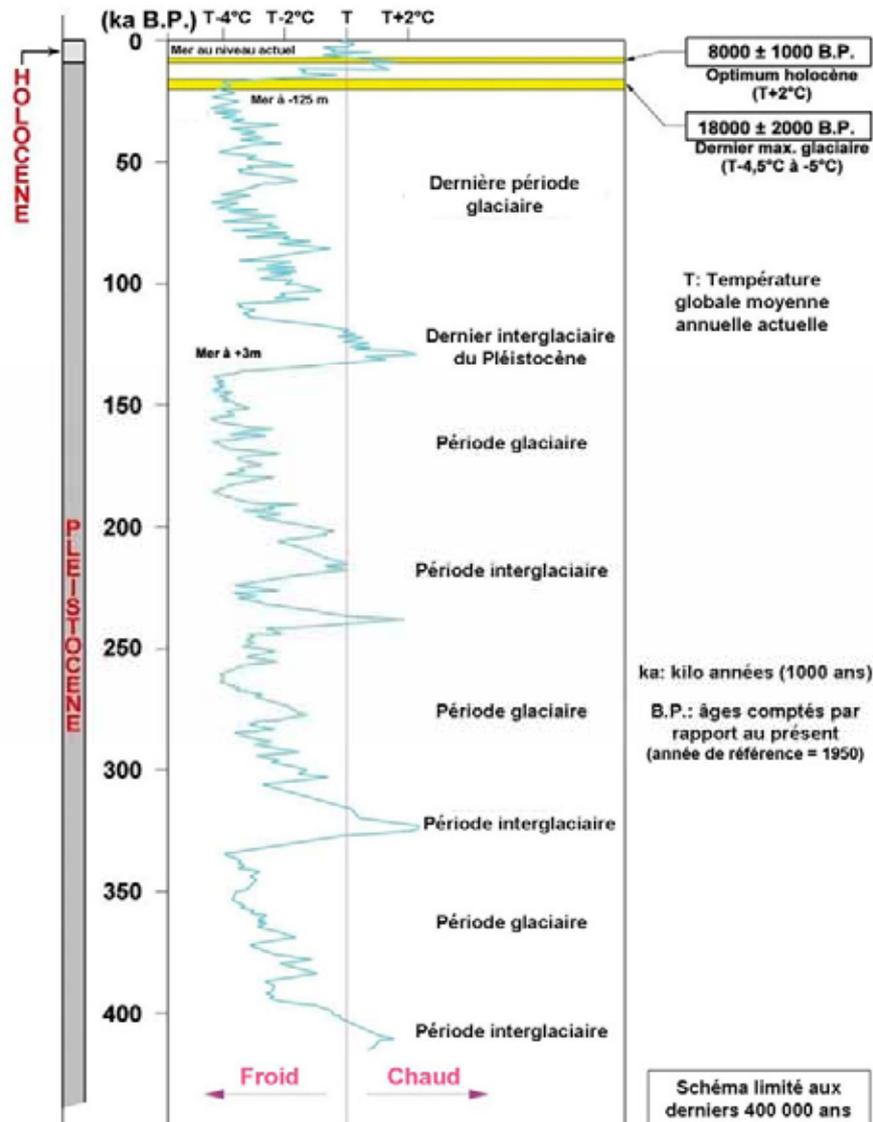


Figure 9.3.1 Variations de la température en Antarctique (Vostok) durant les derniers 400 000 ans (d'après Petit *et al.*, 1999)

Ces cycles glaciaire-interglaciaire peuvent montrer des fluctuations internes en raison de la superposition d'une part de cycles de plus haute fréquence à 20 000 ans et d'autre part d'événements brefs (quelques siècles à milliers d'années), parfois de forte amplitude, qui ne semblent pas régis par la théorie astronomique des climats (Brulhet, 2005b). Malgré ces fluctuations, chacun de ces cycles glaciaire-interglaciaire présente, pour une situation analogue à celle du secteur, une succession de

climats, comparable d'un cycle à l'autre, qui peut être schématisée en 3 phases (Texier & Leclerc-Cessac, 2005) (Figure 9.3.2).

- ✓ Le cycle débute par une période de climat tempéré / océanique (interglaciaire), comme à l'actuel (cf. § 3.5.1), avec des températures moyennes annuelles de l'ordre de 10 °C et des précipitations annuelles de 800 à 1 100 mm. Au sein d'un cycle, cette période est généralement assez courte, de 10 000 à 30 000 ans environ.
- ✓ Le climat de type boréal qui lui succède montre un net refroidissement (température moyenne annuelle de l'ordre de 3 °C), avec des températures moyennes négatives sur les mois de novembre à mars, à l'origine d'un gel saisonnier « profond ». Les précipitations sont sensiblement moins élevées : 600 à 700 mm en moyenne annuelle.
- ✓ Enfin, l'établissement à la suite d'un climat de type toundra, encore plus froid (température moyenne annuelle négative : -2 à -3 °C, et des températures inférieures à 0 °C une grande partie de l'année, d'octobre à mai) permet l'installation d'un pergélisol. Les précipitations sont de l'ordre de 400 mm en moyenne. À l'échelle européenne, cette phase correspond à l'extension maximale des calottes glaciaires. Les reconstitutions du dernier maximum glaciaire montrent que celles-ci couvraient l'ensemble des pays nordiques, jusqu'au centre de l'Allemagne et le sud de l'Angleterre (Figure 9.3.3). À la suite de cette phase, un nouveau cycle débute avec un passage rapide à un climat tempéré.

Les deux derniers stades climatiques (boréal et toundra) représentent le stade glaciaire, d'une durée nettement plus longue (de 70 à 90 000 ans par cycle, en moyenne) que l'interglaciaire. La dynamique de la transition d'un stade à un autre est aussi très différente : le passage interglaciaire à glaciaire et jusqu'au maximum glaciaire se fait de manière très progressive et continue (en faisant abstraction des fluctuations déjà mentionnées). Le passage glaciaire-interglaciaire est lui plus rapide, en quelques milliers d'années (Brulhet, 2005b).

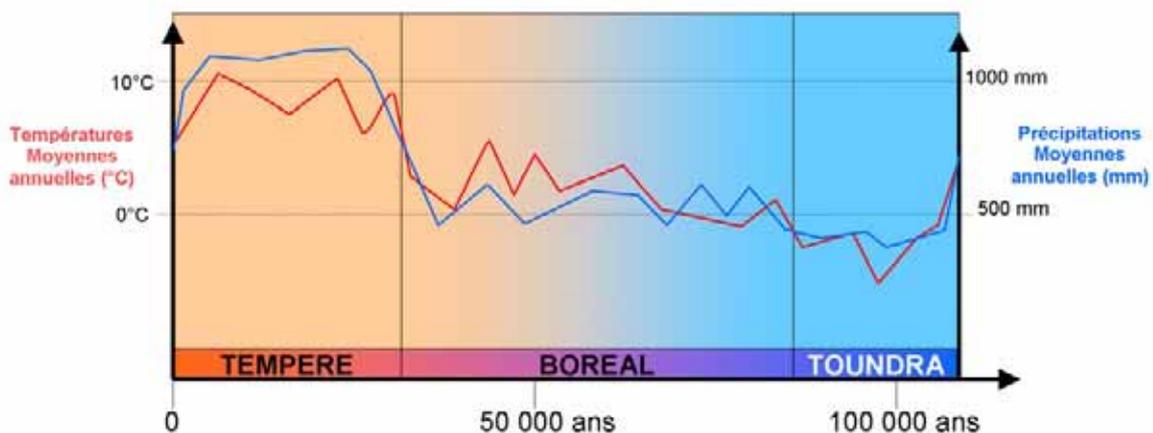


Figure 9.3.2 Représentation schématique des principales phases climatiques durant un cycle glaciaire-interglaciaire, pour une situation comparable à celle du site de Meuse / Haute-Marne

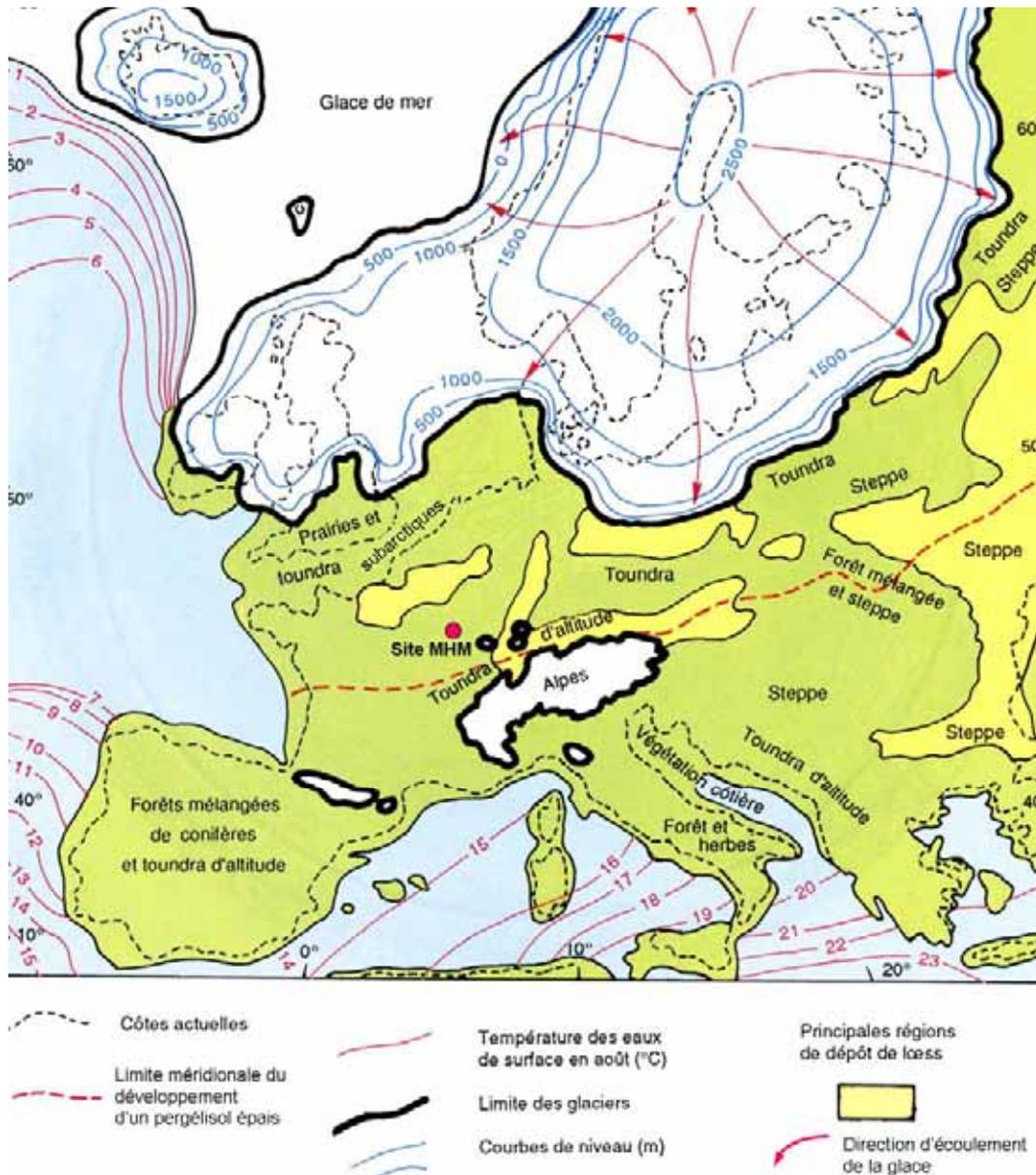


Figure 9.3.3 Extension des calottes glaciaires et des principaux environnements lors du dernier maximum glaciaire (Berger, 1992)

Les modélisations (BIOCLIM, 2002 ; BIOCLIM, 2003b ; Loutre & Berger, 2000) menées sur cette base prévoient l'évolution suivante pour le futur.

- ✓ L'interglaciaire actuel se prolongerait sur 50 000 ans, avant l'entrée dans une nouvelle période de glaciation (Figure 9.3.4, courbe n°1). Le petit épisode plus froid prévu à 20 000 ans, surtout sensible aux hautes latitudes, est sans impact notable au niveau du site de Meuse / Haute-Marne. Cet interglaciaire est suivi, à partir de 50 000 ans, par une nette tendance globale au refroidissement et donc à l'extension des calottes de glace. Après un bref radoucissement autour de 60 000 ans, le refroidissement reprend et les calottes de l'hémisphère nord atteignent un volume maximum à environ 100 000 ans. Ce volume maximum de glace est inférieur à celui atteint lors du dernier maximum glaciaire il y a 18 000 ans (34 millions de km<sup>3</sup> contre 55 millions de km<sup>3</sup>). À la suite de ce maximum glaciaire, le climat se réchauffe et vers 110 000 ans, un nouveau cycle climatique avec ses fluctuations internes commence.

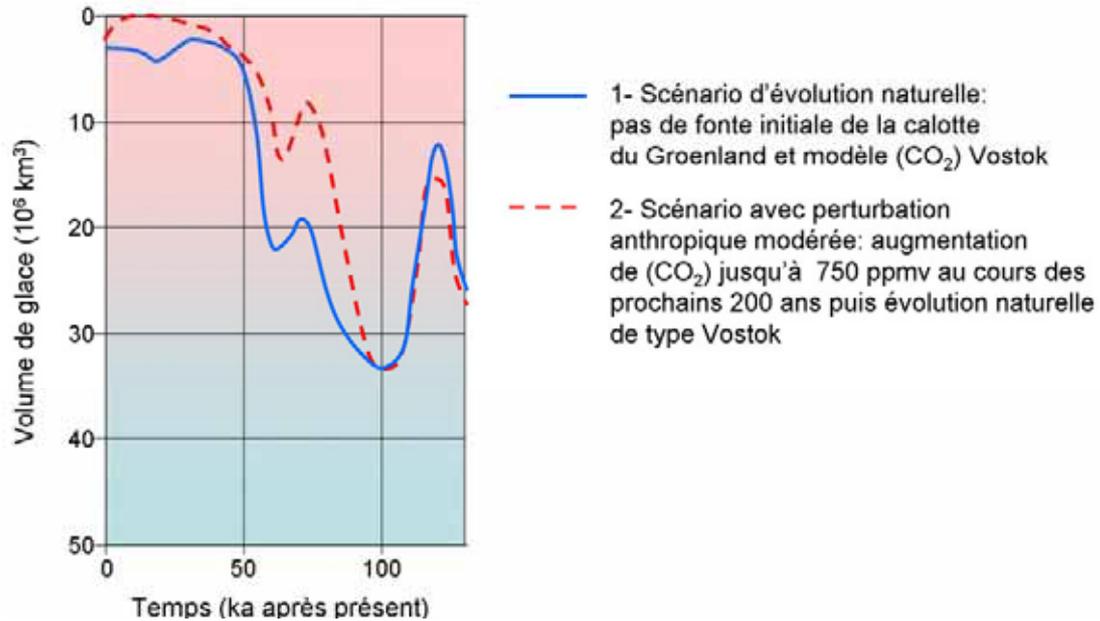


Figure 9.3.4 Simulations du volume des glaces dans l'hémisphère Nord pour les prochains 100 000 ans (d'après Loure & Berger, 2000)

- ✓ À plus long terme, sur 1 Ma, les modélisations confirment la poursuite de ces cycles d'une durée moyenne de 100 000 ans avec, cependant, des périodes froides plus longues jusqu'à 500 / 600 000 ans et des cycles sensiblement plus courts au-delà (Figure 9.3.5).

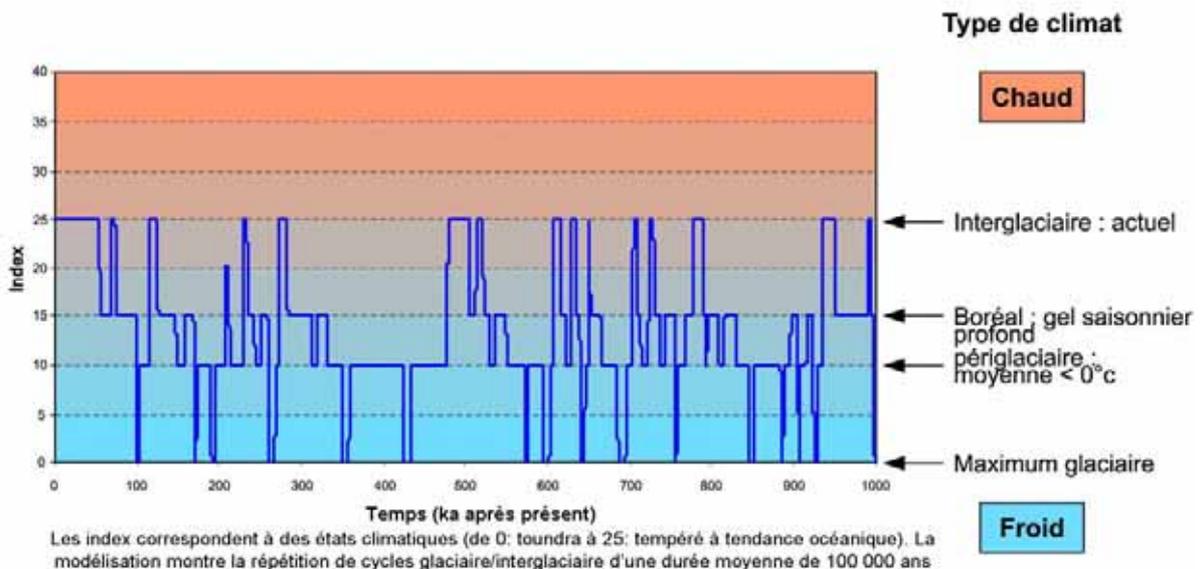


Figure 9.3.5 Scénarios d'évolution naturelle du climat de la région Meuse / Haute-Marne (d'après BIOCLIM, 2003a)

Cette évolution climatique naturelle peut être perturbée durablement par les activités humaines et notamment par l'émission massive de gaz à effet de serre (BIOCLIM, 2002 ; Texier & Leclerc-Cessac,

2005). Différentes approches de modélisation, prenant en compte différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre, ont été tentées pour quantifier cette perturbation. Pour une perturbation anthropique « modérée » (courbe n°2 de la Figure 9.3.4), les modélisations montrent l'évolution perturbée reproduisant les mêmes tendances sur un cycle que l'évolution non perturbée : l'épisode plus froid à 20 000 ans peut être gommé selon les hypothèses, le minimum à 60 000 ans est bien moins important mais l'amplitude du maximum glaciaire à 100 000 ans reste inchangée (Loutre & Berger, 2000).

Les approches menées dans le cadre du projet BIOCLIM (BIOCLIM, 2002 ; BIOCLIM, 2003a), plus spécifiques au Nord-Est de la France, confirment cette tendance. Néanmoins, d'autres scénarios avec une perturbation plus importante ont également été testés (hypothèse de CO<sub>2</sub> croissant jusqu'à environ 1 150 ppm pendant les prochains 300 ans et avec décroissance exponentielle ensuite jusqu'à 1 million d'années). Les modélisations montrent toutes, pour des perturbations de ces ordres de grandeurs, une forte diminution du volume des glaces de l'hémisphère nord ainsi qu'une prolongation de la période interglaciaire actuelle de plusieurs dizaines de milliers d'années avec une première installation d'un climat périglaciaire repoussée vers 170 à 180 000 ans environ, pour le Nord-Est de la France (Figure 9.3.6). Son amplitude (volume de glaces estimé à 17 millions de km<sup>3</sup>) serait nettement inférieure à celle du dernier maximum glaciaire et à celle modélisée dans le cadre d'une évolution naturelle (respectivement 55 et 35 millions de km<sup>3</sup>). Suite à cet épisode glaciaire, la reprise des cycles climatiques naturels n'est pas immédiate : celle-ci pourrait être différée au-delà de 600 000 ans (Figure 9.3.6). Jusqu'à 600 000 ans, ce scénario avec perturbation anthropique montre des périodes interglaciaires avec un climat sensiblement plus chaud que la période tempérée à tendance océanique actuelle (index 30, Figure 9.3.6). Ce climat, dont les analogues sont à rechercher sur la façade atlantique de Espagne ou du Portugal, montre une tendance océanique forte avec précipitations abondantes, du même ordre de grandeur annuel que le climat actuel au droit du site, avec cependant des températures moyennes annuelles plus élevées de 4 à 5 °C (Texier & Leclerc-Cessac, 2005). Globalement, l'apparition de ce climat sur les prochains 600 000 ans a donc peu d'impact par rapport au climat actuel, permettant de considérer que, durant cette période, dans le cadre d'un scénario avec perturbation anthropique, le climat représentatif de l'interglaciaire actuel est le climat dominant.

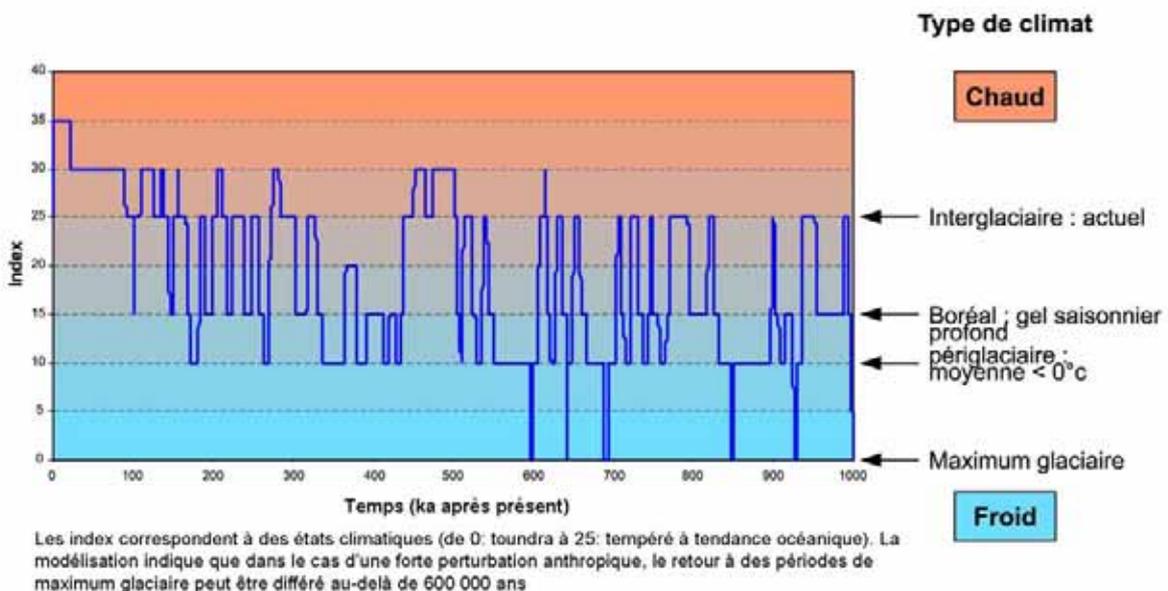


Figure 9.3.6 *Évolution climatique selon un scénario avec une forte perturbation anthropique pour le prochain million d'années sur le site de Meuse / Haute-Marne (d'après BIOCLIM, 2003a)*

D'une manière générale, ces modélisations à long-terme des évolutions climatiques visent plus à évaluer les tendances qu'à prédire finement ces évolutions. Elles restent très tributaires des scénarios

retenus, ainsi que le montre l'ensemble des simulations réalisés dans le cadre du projet BIOCLIM. La multiplicité des scénarios testés permet toutefois de proposer les deux évolutions décrites ci-dessus (évolution naturelle et évolution affectée par une forte perturbation anthropique) comme enveloppe des situations climatiques possibles sur le prochain million d'années.

## 9.4 Les conséquences des évolutions climatiques

### 9.4.1 La mise en place et le retrait périodique d'un pergélisol

Par définition, le pergélisol est la tranche de terrain dans laquelle l'eau reste gelée en permanence au cours de l'année. D'une manière générale, la mise en place de ce pergélisol correspond à un processus dynamique d'épaississement et de résorption (Brulhet, 2005b). Elle peut se schématiser par une augmentation de l'épaisseur gelée, progressivement ou par palier, dès que les températures moyennes annuelles sont négatives sur des périodes relativement longues (climat de type tundra). Dès la fin de la période glaciaire, il se résorbe par le haut (depuis la surface à cause du réchauffement climatique) et par le bas (flux géothermique). Latéralement, il peut présenter un caractère continu ou discontinu en fonction de l'intensité de la glaciation et des conditions de surface (présence de couverture neigeuse ou non, hydrologie de surface, exposition des versants,...).

Les analyses et reconstitutions menées sur les derniers cycles climatiques à l'échelle du bassin de Paris (Brulhet, 2005b) confirment la présence d'un pergélisol épais et continu sur tout l'Est et le Nord de la France pendant les périodes de maximum glaciaire. Pour des situations climatiques moins extrêmes, cette continuité est affectée par les vallées majeures dans ces régions.

Sur le site du laboratoire souterrain, les enseignements des différentes reconstitutions (courbes de pénétration de l'isotherme zéro au cours du dernier cycle climatique, répartition du pergélisol en fonction de la morphologie,...) permettent d'envisager, pour les prochains cycles, le développement d'un pergélisol continu sur toute la zone en période de maximum glaciaire et également pour les longues périodes froides (périodes de 350 000 à 450 000 ans, de 560 000 à 620 000 ans et de 850 000 à 900 000 ans, en situation non perturbée).

Sur la base de modélisations menées à partir des données du dernier cycle glaciaire, ce pergélisol montre la structure suivante (Brulhet, 2005b).

- ✓ En surface, le développement d'une glace de ségrégation, avec des lentilles de glace, obstrue toute la porosité. Sur les plateaux (substratum calcaire), cette zone est le siège de phénomènes de gélifraction. L'épaisseur maximum de cette zone, soumise au gel permanent à chaque cycle, est de l'ordre de 35 m maximum, ce qui est en accord avec les observations des fractures des terrains supérieurs dans les puits du laboratoire souterrain. À une position équivalente à celle du site, cette zone concerne donc les Calcaires du Barrois et la partie supérieure du Kimméridgien marneux.
- ✓ Au-dessous le gel ne pénètre plus profondément, jusque vers 100 à 200 m de profondeur, qu'à la faveur des réseaux de diaclases et de fractures. Celles-ci forment un réseau de moins en moins dense en fonction de l'approfondissement. Entre ces films sub-verticaux, la porosité est occupée par une eau plus salée (sel expulsé par le gel) en état cryotique. À l'aplomb du site, cette zone ne concerne au maximum que les horizons poreux les plus supérieurs de l'Oxfordien carbonaté.
- ✓ Plus bas, et jusqu'à l'isotherme 0 °C (soit 300 m environ au maximum), il n'y a plus de glace exprimée, mais une eau en état cryotique à laquelle peuvent se mêler des hydrates produits à partir des gaz dissous dans les aquifères. Ces derniers sont susceptibles de se former dans la

tranche +5 à -5 °C, soit jusqu'à 400 m de profondeur au maximum, jusqu'au niveau des horizons poreux les plus profonds de l'Oxfordien carbonaté au niveau du site.

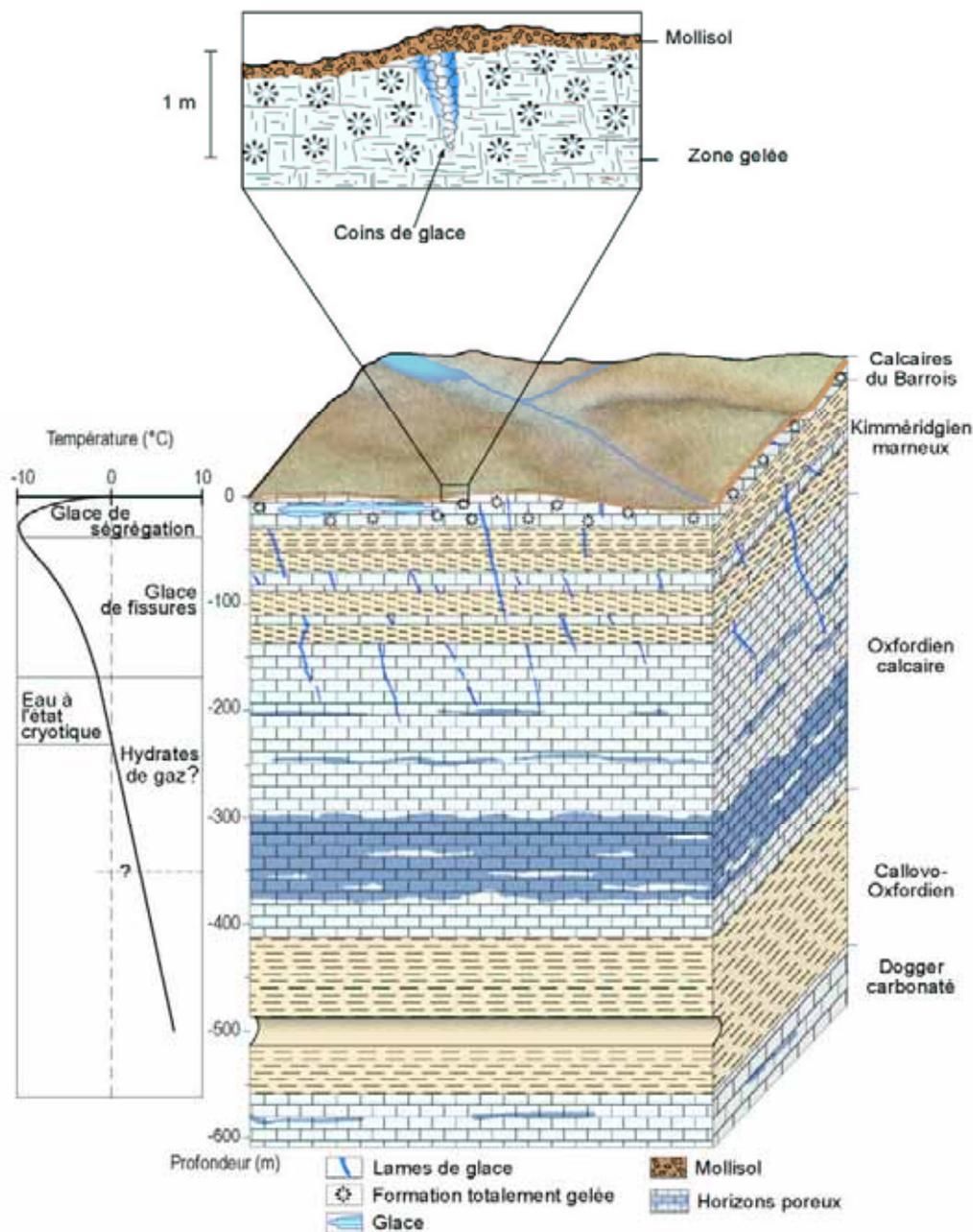


Figure 9.4.1 Modèle conceptuel de pergélisol futur sur le site de Meuse / Haute-Marne

Ce pergélisol est moins épais sous les vallées. Il y reste cependant continu durant les situations de maximum glaciaire, les écoulements saisonniers ne permettant pas le dégel en profondeur. Néanmoins, au point d'émergence des aquifères, les sorties d'eau peuvent empêcher très localement la formation de pergélisol. Un conduit non gelé peut alors subsister, se marquant, en hiver, par une langue de glace en fond de vallée (talik).

Pour les autres épisodes froids, moins intenses, le pergélisol reste continu sur les plateaux, mais avec des épaisseurs moindres que celles mentionnées ci-dessus. Le maintien des écoulements fluviaux permet aux vallées de constituer des couloirs de discontinuité.

Dans le cas d'une perturbation anthropique importante (émission massive de gaz à effet de serre selon les hypothèses mentionnées plus haut), les évaluations menées montrent que le développement d'un pergélisol continu ne semble pas possible avant le retour à des cycles climatiques non perturbés, soit aux alentours de 600 000 ans (Brulhet, 2005b ; Texier & Leclerc-Cessac, 2005).

#### 9.4.2 L'évolution des biosphères

Les cycles climatiques ont également un impact important sur l'environnement de surface. Celui-ci, tel qu'il est décrit dans le chapitre 4.4 à l'actuel va progressivement évoluer avec le passage à un climat de type boréal (Texier & Leclerc-Cessac, 2005) (Figure 9.4.2). Durant l'hiver, la baisse des températures induit un gel saisonnier des rivières, des lacs et des premiers mètres du sol, provoquant une diminution de l'eau disponible en surface et bloquant les infiltrations.

Néanmoins, de l'eau reste disponible localement toute l'année aux exutoires des nappes souterraines. Au printemps, la fonte des neiges et des glaces accumulées en surface pendant l'hiver accroît le ruissellement de surface, déstabilise les versants et érode les sols. En fond de vallées, les rivières grossissent (multiplication du débit par 4 par rapport à l'actuel). Ces débits permettent un début d'érosion des vallées alluviales. Sur les plateaux, la végétation naturelle évolue vers une forêt boréale adaptée au froid. La pédogenèse est ralentie et les sols se chargent en matière organique. En quelques milliers d'années, ces sols deviennent des sols bruns sur les plateaux et des sols caillouteux dans les vallées. Dans les dépressions marneuses, des tourbières se développent.

Tous ces facteurs conditionnent l'activité humaine : les fonds de vallées deviennent moins accueillants, les espaces agricoles se réduisent. Toutefois, l'agriculture reste possible sur les plateaux.

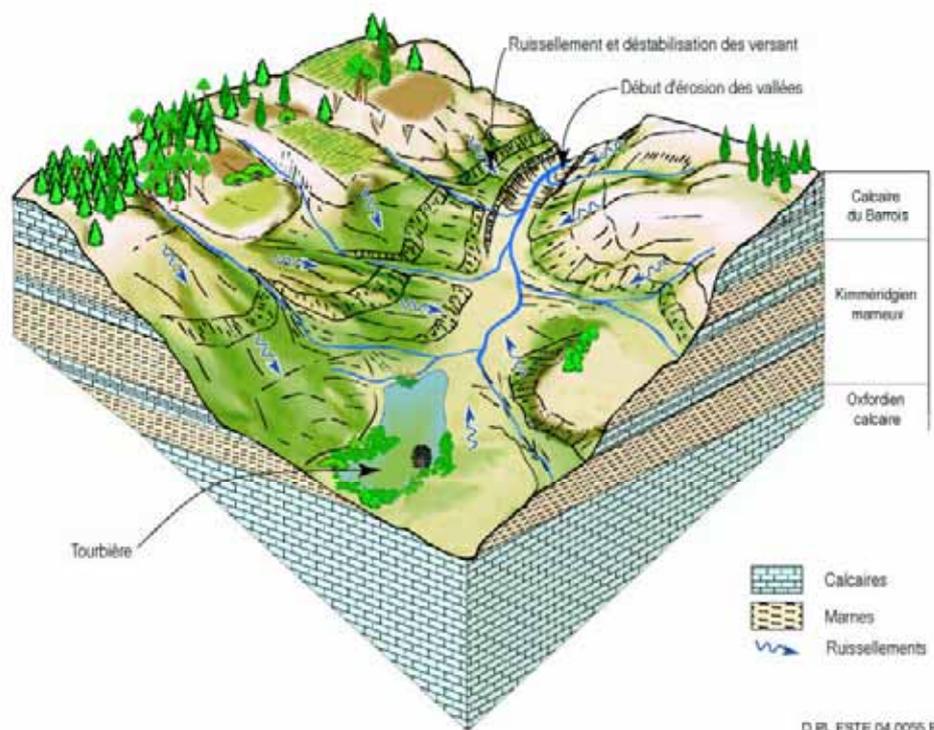


Figure 9.4.2 Représentation schématique du stade climatique « boréal » - Végétation et évolution de la biosphère aux alentours du site du laboratoire souterrain

Le passage à un climat de type toundra et le refroidissement supplémentaire qu'il apporte permettent la poursuite des phénomènes décrits ci-dessus (Texier & Leclerc-Cessac, 2005) (Figure 9.4.3). Le long hiver gèle les lacs et rivières une grande partie de l'année. Les eaux de surface sont alors d'un accès très restreint, la présence d'un pergélisol empêchant l'exploitation des nappes souterraines proches de la surface. Seules quelques sources restent pérennes (taliks). Pendant le court été, seuls les premiers mètres de sol dégèlent. Les phénomènes érosifs dus à la fonte des glaces et de la neige sont amplifiés par rapport à la situation climatique précédente : les versants sont dénudés (éboulis) et deviennent instables, augmentant encore l'érosion. En fond de vallée, les reliquats des dépôts alluviaux sont emportés par les crues (débits multipliés par 8 par rapport à l'actuel), les sols disparaissent et les rivières attaquent le substratum au milieu de cailloutis apportés latéralement. Dans les zones argileuses, les tourbières et les marécages se développent. Sur les plateaux, les sols évoluent vers des sols bruns arctiques. L'aridité, les basses températures et l'action destructive des cycles gel/dégel font disparaître les arbres et permettent le développement d'une végétation rase et herbacée typique des milieux toundra : saules et bouleaux nains, genévriers, lichens et champignons. Par rapport au stade climatique boréal, les activités agricoles diminuent encore. Sur les plateaux, ces activités sont plutôt tournées vers l'élevage en stabulation. Les espaces naturels augmentent, la faune s'adapte au froid (renne, bœuf musqué, loup,...) et devient en grande partie migratoire.

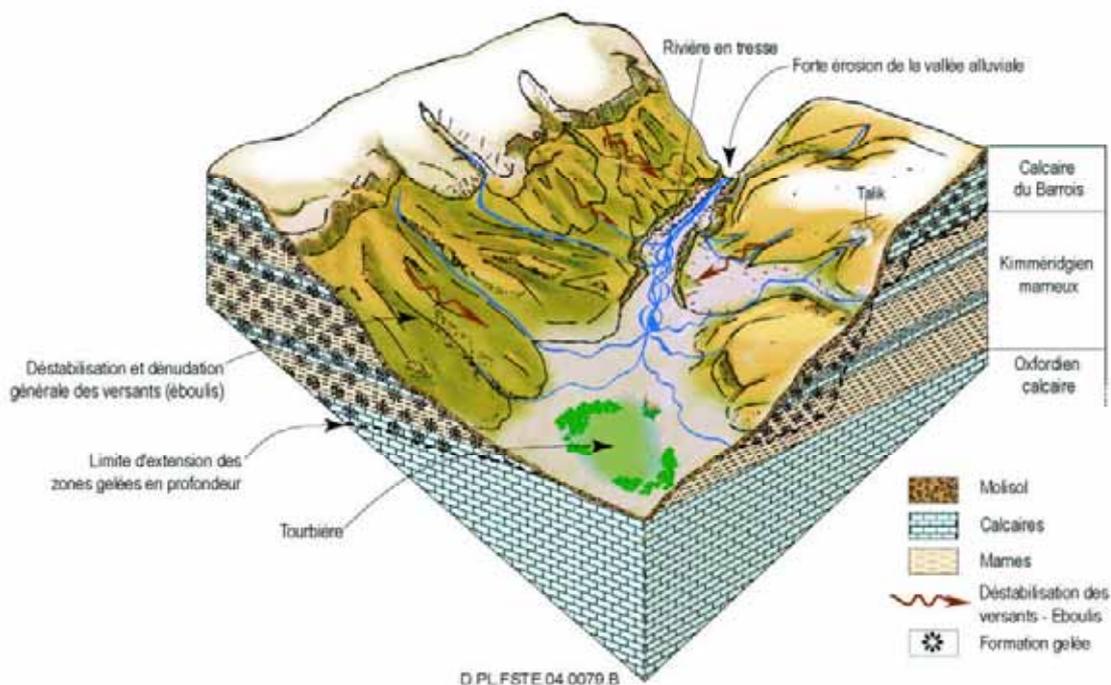


Figure 9.4.3 Représentation schématique du stade climatique « toundra » - Végétation et évolution de la biosphère aux alentours du site

À la fin de la période glaciaire, le retour relativement rapide vers des conditions tempérées permet de retrouver la situation actuelle : reconstitution des sols et des plaines alluviales après résorption du pergélisol (régularisation des débits de ruissellement et des rivières), réinstallation d'un couvert végétal dense et diversification de la faune, disponibilité des ressources en eau toute l'année (augmentation des précipitations, diminution des durées de gel hivernal), développement des espaces

agricoles à la fois sur les plateaux et dans les vallées mais également dans les tourbières et zones marécageuses héritées de la période froide précédente.

Dans le cas d'une perturbation anthropique importante du climat, ces cycles sont perturbés sur les prochains 600 000 ans. Sur cette durée, les modélisations montrent une prédominance de climat de type tempéré, parfois plus chaud que le climat actuel sur le site de Meuse / Haute-Marne, avec quelques courts intervalles plus froids (boréal) (Brulhet, 2005b ; Texier & Leclerc-Cessac, 2005).

## 9.5 Les modifications de la topographie

Les dynamiques des processus d'évolution de la morphologie sont contrôlées par des processus qui interagissent selon des échelles de temps très différentes. On distingue ainsi :

- ✓ des modifications périodiques, liées à la cyclicité des variations climatiques et notamment des cycles glaciaire-interglaciaire (contrôle des ruissellements et de l'érosion de surface, action du gel,...), évaluées dans le § ci-dessus,
- ✓ des modifications progressives, à l'échelle d'une succession de plusieurs cycles glaciaire-interglaciaire dont les effets sont cumulées sur le long terme et contrôlées par la tectonique.

Les évolutions phénoménologiques sur le long terme sont évaluées sur la base de la résultante de plusieurs cycles du passé, extrapolée pour le futur en prenant en compte les hypothèses de géodynamique interne déjà exposées : surrection modérée à l'échelle du prochain million d'années (de l'ordre de la centaine de mètres/Ma), en prolongement de la surrection passée (Brulhet, 2005b).

Ces évolutions montrent des dynamiques propres à chaque zone géomorphologique. À l'échelle du secteur, la dynamique de l'évolution de la topographie est schématisée de la manière suivante (Brulhet, 2005b) (Figure 9.5.1).

- ✓ Les vallées et les lits des rivières évoluent rapidement, sur quelques millénaires, en entrée de phase glaciaire. Sur le long terme, les gammes de vitesse d'incision, intégrées sur plusieurs cycles, sont dépendantes de l'historique de chaque tronçon de vallée (phénomènes de capture modifiant les débits, conditions hydrographiques) et de la nature du substratum entaillé localement. Les analyses menées montrent que le fond des vallées majeures présente sur le long terme des taux d'incision du même ordre de grandeur que la surrection tectonique, soit de la centaine de mètres par Ma (sur la base de la poursuite de la surrection avec la même dynamique qu'à l'actuel). Pour la période après 500 000 ans, un ralentissement de la surrection se traduirait par une diminution de ces vitesses d'incisions. En tête de vallée, les vitesses d'érosion sont du même ordre de grandeur que celles des plateaux (voir ci-dessous). Le long des cours des vallées, les vitesses sont donc variables selon les tronçons considérés et fonction des spécificités de chaque cours d'eau (pente, nature du substratum,...). Les phénomènes de capture restent essentiellement locaux, au moins sur les premiers 500 000 ans, permettant ainsi de considérer les vitesses d'incision proposées dans les vallées principales comme pérennes.
- ✓ La dynamique d'évolution des plateaux calcaires est faible. Les valeurs obtenues à partir de la reconstruction des positions estimées des surfaces initiales montrent des ablations de quelques mètres par 100 000 ans. Contrairement aux vallées, cette évolution se produit essentiellement durant les périodes interglaciaires, le phénomène prédominant étant la dissolution des carbonates par les eaux météoriques.
- ✓ Situées en pied de côte, les dépressions argileuses et marneuses, correspondant aux formations du Callovo-Oxfordien et du Kimméridgien, montrent une évolution conditionnée, à long

terme, par la mise à l'affleurement des couches calcaires sus-jacentes. Les vitesses moyennes d'ablation dans ces dépressions argileuses et marneuses sont de l'ordre de 3 à 5 m / 100 000 ans.

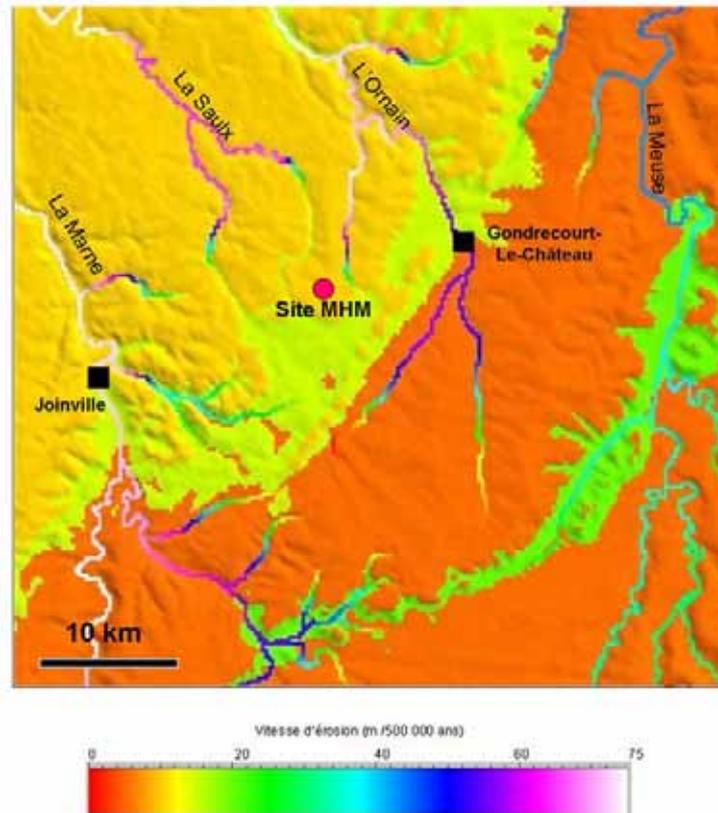


Figure 9.5.1 Variabilité spatiale des vitesses d'érosion moyennes sur le long terme à l'échelle du secteur

Les principales évolutions à long terme de la morphologie du secteur sont donc (Andra, 2005h, chapitre 40 ; Brulhet, 2005b), (Figure 9.5.2):

- ✓ un recul des côtes vers le Nord-Ouest (vitesse de 1 à 2 km.Ma<sup>-1</sup>), recul initié par l'abaissement de la surface des plateaux et facilité par la déstabilisation des versants lors des phases glaciaires, Ainsi, à l'aplomb du laboratoire souterrain, les Calcaires du Barrois auront complètement disparu à l'échelle du prochain million d'années. D'une façon générale, ce recul des formations calcaires s'accompagne d'un recul des zones karstifiées qui sont observées dans ces formations lorsqu'elles sont à l'affleurement (voir § 3.3.2). De même, les zones de Kimméridgien marneux à l'affleurement, globalement plus perméables que les zones sous couverture, se déplacent vers le Nord ;
- ✓ un encaissement des vallées, dû au différentiel d'érosion entre ces dernières et les surfaces des plateaux avec mise à l'affleurement en fond de vallées de formations géologiques plus anciennes (apparition d'Oxfordien carbonaté au fond de la vallée de l'Ormain au nord du site, déplacement des zones d'affleurement vers le nord dans la vallée de la Marne, creusement jusqu'aux calcaires de l'Oxfordien dans le cours amont de la Saulx, à l'Ouest du laboratoire). Cet encaissement ne conduit toutefois pas à des modifications importantes du paysage et des conditions initiales topographiques.

Cette évolution reste identique, dans ses grandes lignes, dans le cas d'une perturbation importante des cycles climatiques, notamment à cause des activités anthropiques.

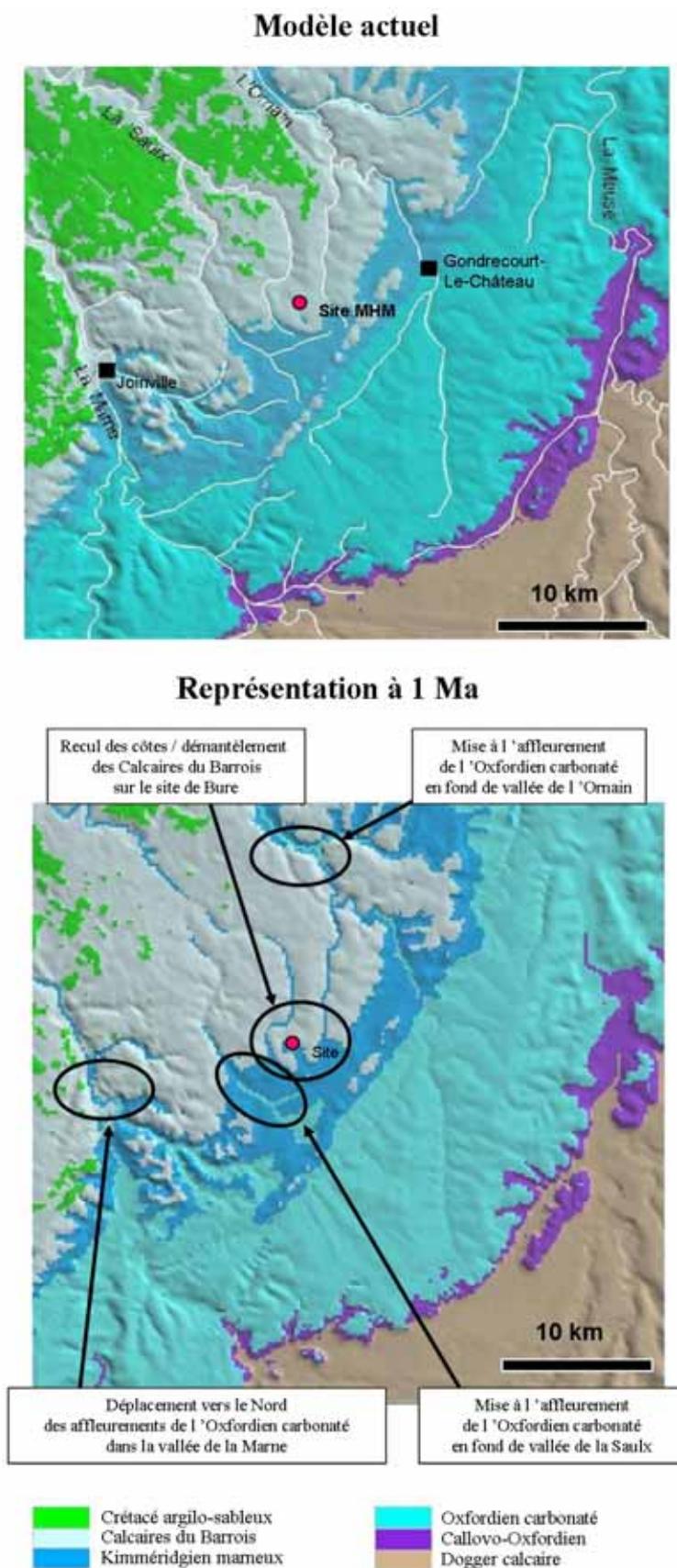


Figure 9.5.2 Évolution de la morphologie du secteur de l'actuel jusqu'à un million d'années

## 9.6 Les effets des évolutions sur les formations géologiques et les environnements de surface

À l'échelle du secteur, l'impact de l'évolution géodynamique sur les formations géologiques est très différent selon que l'on considère le Callovo-Oxfordien, pour lequel les conséquences sont faibles et les formations encaissantes ou l'environnement de surface, qui montrent des modifications périodiques (liées aux cycles climatiques) et à long terme (liées aux modifications de la topographie).

### 9.6.1 Le Callovo-Oxfordien

Sur le long terme, la profondeur de la couche et la localisation du site rendent le Callovo-Oxfordien, de même que les ouvrages du stockage, peu sensibles vis-à-vis des phénomènes géodynamiques internes (variations de l'état de contrainte, séismes) et externes (variations climatiques et effets de surface) sur la zone de transposition.

Concernant l'état de contrainte, celui-ci, acquis depuis au moins 20 millions d'années, n'est pas susceptible d'être modifié à l'échelle du prochain million d'années. Seuls, les phénomènes d'érosion modifieront la contrainte verticale. Cependant, cette érosion reste faible (de l'ordre de 40 à 60 m au maximum (Brulhet, 2005b)). En effet, le site du laboratoire, considéré en référence pour la position du stockage dans le cadre de cette analyse, correspond à la zone du plateau du Barrois et est éloignée des vallées majeures susceptibles de montrer des taux d'érosion plus importants. La modification de la contrainte verticale en résultant reste donc négligeable et ne modifie pas l'état de contrainte actuelle.

Les analyses des effets de séismes possibles (et de leur période de retour) à l'échelle du prochain million d'années montrent que ceux-ci n'ont pas d'impact en profondeur tant sur le Callovo-Oxfordien que sur les ouvrages de stockage (Brulhet, 2005a) et (Andra, 2005h, chapitre 38), la zone étant sismiquement calme, à l'écart des grandes failles (cf. § 9.2).

La profondeur de la couche place celle-ci et les ouvrages du stockage à l'abri des perturbations de surface induites par les phénomènes climatiques, notamment les cycles glaciaire-interglaciaire d'une durée de 100 000 ans (Brulhet, 2005b). En effet, la couche est située largement sous la profondeur maximale du pergélisol susceptible d'être créé lors des épisodes de maximum glaciaire. La température de la couche en est cependant affectée, transitoirement, de quelques degrés (température de l'ordre de 6 à 8 °C au minimum au centre de la couche en situation de maximum glaciaire, par rapport à une température actuelle de 22 °C – cf. § 3.2.3.1). En raison de l'absence de glaciers à l'aplomb du site, même en situation de maximum glaciaire, la contrainte verticale n'est pas affectée par les phénomènes climatiques.

### 9.6.2 Les formations encaissantes

Comme pour le Callovo-Oxfordien, les phénomènes de géodynamique interne ont peu d'effets sur les encaissants. Seuls les séismes, par leur action potentielle sur les failles régionales, peuvent modifier les écoulements hydrogéologiques dans les aquifères, par création ou réactivation d'une porosité fissurale. Ces modifications ne concernent que les failles potentiellement le siège de mouvements tectoniques à l'échelle du secteur : failles de la Marne ou fossé de Gondrecourt. Dans la gamme des séismes possibles sur le secteur, par analogie avec des observations réalisées par ailleurs dans le monde, les effets envisagés sont essentiellement transitoires et réversibles (Brulhet, 2005a) et (Andra, 2005h, chapitre 38). Ces derniers restent d'ailleurs essentiellement locaux, à proximité des failles, et ne modifient pas les grandes directions des trajectoires hydrauliques (Brulhet, 2005b).

En revanche, les phénomènes de géodynamique externe, pilotés en grande partie par les évolutions climatiques, ont un effet plus sensible.

Concernant les prochaines centaines de milliers d'années, les modélisations montrent que les émissions massives de gaz à effet de serre peuvent empêcher, dans les scénarios extrêmes, le retour de conditions glaciaires sur le site pour ces durées. Au-delà, les cycles climatiques reprennent une évolution « naturelle ».

Quel que soit le scénario, les cycles glaciaire-interglaciaire de 100 000 ans ont une influence significative sur les écoulements dans les formations encaissantes.

- Le développement d'un pergélisol, plus ou moins continu en période maximum glaciaire, bloque les infiltrations aux affleurements et est également susceptible au niveau du site de limiter les écoulements dans les aquifères les moins profonds (aquifères de surface mais également les niveaux poreux supérieurs de l'Oxfordien carbonaté du fait de la présence en profondeur d'eau gelée dans les fractures, voire d'hydrates de gaz). Ces cycles ont également un effet transitoire sur la chimie des eaux des encaissants : le phénomène d'exclusion des sels lors du gel implique une concentration progressive de ceux-ci au front du pergélisol (Brulhet, 2005b). L'impact de ce phénomène est limité du fait de la faible profondeur de pénétration du pergélisol (vers 35 mètres de profondeur, soit bien au-dessus de l'Oxfordien carbonaté sur la zone de transposition) et des durées pendant lesquelles il se développe. En effet, ce phénomène ne concerne que des courtes périodes de temps au sein d'un cycle (de l'ordre de 20 000 ans sur une durée totale du cycle de 100 000 ans), qui restent faibles par rapport aux temps caractéristiques de transfert dans les encaissants (plusieurs centaines de milliers d'années).
- À l'échelle du million d'années, l'enchaînement des cycles climatiques conditionne l'évolution géomorphologique du paysage, avec notamment le démantèlement des formations calcaires de plateaux et le creusement des vallées. Ces phénomènes modifient progressivement les aires de recharge des formations aquifères ainsi que leurs exutoires. Les circulations dans les formations sont d'autant plus affectées que ces formations sont proches de la surface. Ainsi, le Dogger qui, à l'aplomb du site, est situé loin de ses affleurements, ne montre que des modifications mineures en terme de direction d'écoulement ou de gradient de charge (Brulhet, 2005b) et (Andra, 2005h, chapitre 41). En revanche, l'aquifère de l'Oxfordien carbonaté présente une évolution plus marquée : la mise à l'affleurement de certaines parties de la formation en fond de vallée dans des zones à l'aval des écoulements détermine le déplacement des exutoires actuels (Vallée de la Marne) ou la création de nouveaux (vallée de l'Ornain). Ces perturbations du champ de charge vont faire ainsi progressivement disparaître, au-delà de 500 000 ans, la direction d'écoulement régionale vers le centre du bassin, existant à l'actuel à partir du site, au profit de directions d'écoulement vers des exutoires naturels locaux (Vallée de la Marne, qui reste pérenne, vallée de l'Ornain au nord du site) (Brulhet, 2005b) et (Andra, 2005h, chapitre 38) (Figure 9.6.1). Sur la zone de transposition, le gradient de charge moyen de l'Oxfordien carbonaté est multiplié par deux à un million d'années, ce qui entraîne des vitesses de transfert convectif d'un soluté non sorbé de quelques kilométrique par 100 000 ans. À l'horizon du million d'années, l'érosion amène également l'Oxfordien carbonaté directement à l'affleurement, à l'Ouest du site, dans le cours supérieur de la Saulx (Figure 9.5.2). Le point bas topographique ainsi créé conduit à l'apparition d'un exutoire naturel local dans cette vallée. Les trajectoires depuis le site vers cet exutoire se développent au détriment d'une partie des écoulements vers la vallée de la Marne. Entre le site et ce point bas, les gradients de charge sont élevés, de l'ordre de 2 % (LSCE / CEA, 2004). Les temps de transfert convectif d'un soluté non sorbé depuis le site vers cet exutoire sont de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'années. Toutes ces évolutions sont progressives entre l'actuel et un million d'années. Les modifications décrites ci-dessus deviennent sensibles dès 500 000 ans.

Ces modifications à l'échelle du million d'années dans les encaissants conditionnent également l'évolution progressive dans le temps du gradient de charge vertical dans le Callovo-Oxfordien. Ce gradient, déterminant sur la zone de transposition des écoulements essentiellement ascendants à l'actuel, va devenir plus important du fait de la diminution de charges dans l'Oxfordien carbonaté. Sur cette zone, il va ainsi passer de valeurs maximales de  $0,2/0,3 \text{ m.m}^{-1}$  à l'actuel à des valeurs de l'ordre

de  $0,4 \text{ m.m}^{-1}$  à un million d'années (Andra, 2005b, Situation 81) (Figure 9.6.2). Cette augmentation du gradient ne modifie cependant pas le mode de transfert dominant dans la couche qui reste la diffusion.

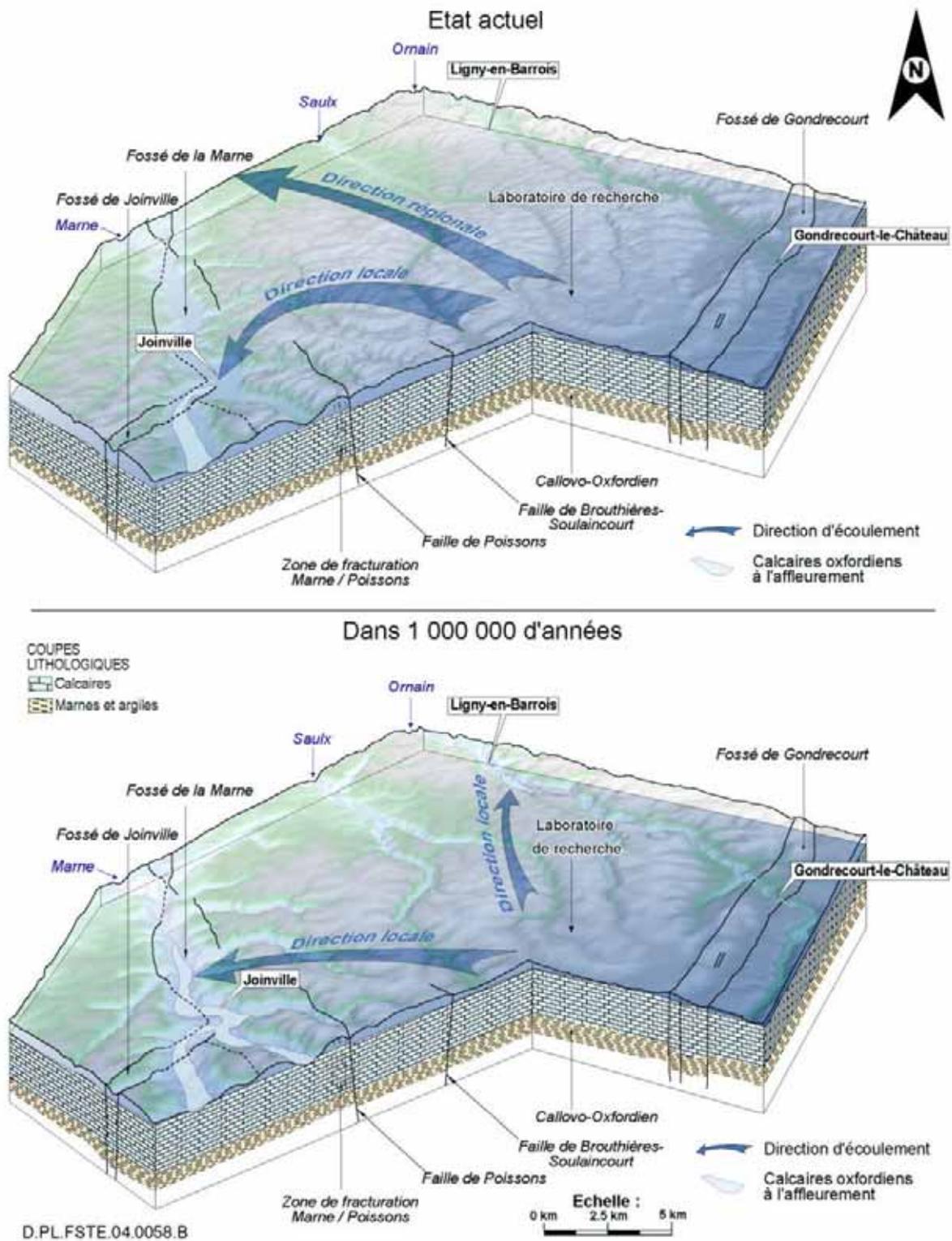


Figure 9.6.1 Représentation schématique de l'évolution des écoulements dans l'Oxfordien carbonaté de l'actuel à un million d'années

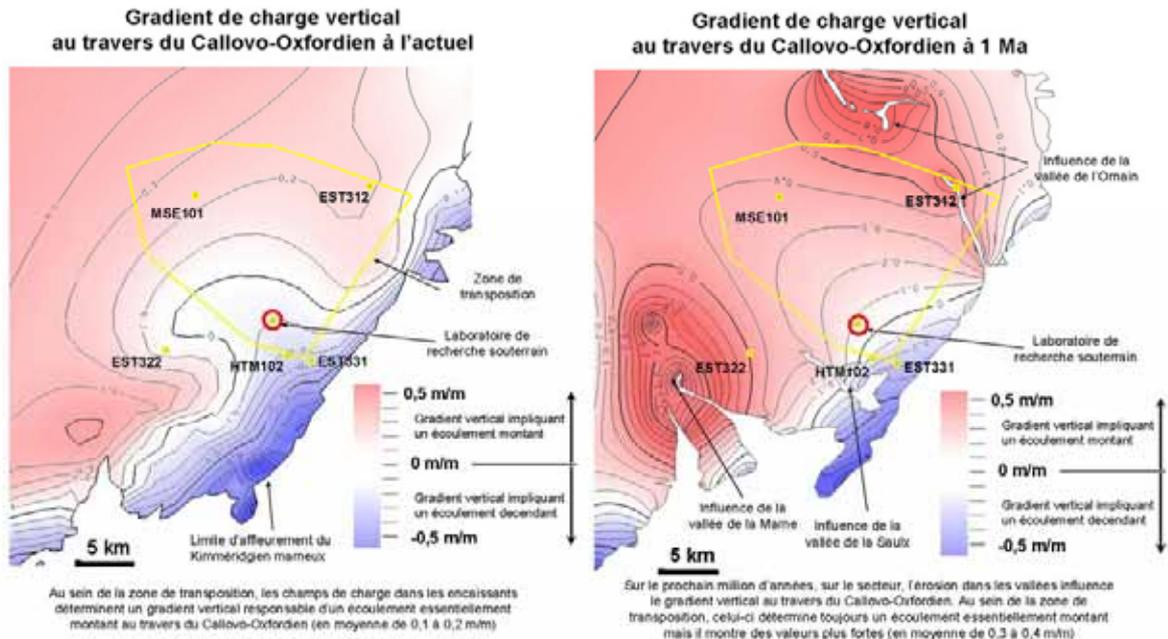


Figure 9.6.2 Représentation schématique de l'évolution du gradient de charge vertical dans le Callovo-Oxfordien de l'actuel à un million d'années

### 9.6.3 L'environnement de surface

Les cycles climatiques perturbent périodiquement les environnements de surface. Les fluctuations de température et de pluviométrie imposent des enchaînements de biosphères. Ainsi, sur l'ensemble du secteur, dans le cadre d'un cycle naturel de 100 000 ans, la biosphère tempérée laisse progressivement place à une biosphère de type « boréale » puis à une biosphère de type « toundra », plus froide.

À l'échelle du prochain million d'années, il convient de distinguer l'évolution naturelle du site d'une évolution perturbée par les effets anthropiques. Ces évolutions, telles que restituées par les modélisations, peuvent se schématiser ainsi (Texier & Leclerc-Cessac, 2005) :

- ✓ l'évolution naturelle du climat suggère la répétition de cycles de 100 000 ans, avec nette prédominance de biosphères périglaciaires, durant les 500 000 premières années. Au-delà, les biosphères « froides » restent globalement dominantes mais les cycles montrent des enchaînements plus rapides (périodes moyennes de 50 000 à 70 000 ans).
- ✓ une perturbation anthropique importante du climat, suite à l'émission massive de gaz à effet de serre, ne permet plus, durant les prochaines centaines de milliers d'années, l'installation au cours des prochains cycles d'une biosphère de type « toundra ». La biosphère tempérée devient alors nettement prédominante durant cette période. Au-delà de 600 000 ans, les cycles reprennent à l'image de la situation d'évolution naturelle.

## 9.7 Synthèse sur les évolutions géodynamiques des formations géologiques et des environnements de surface

Le chapitre 5.6 décrit le cadre général, les moteurs et les effets de l'évolution géodynamique future du secteur. La présente synthèse s'attache à extraire de celui-ci, en lien avec le chapitre sur le relâchement et le transfert des radionucléides et des toxiques chimiques (cf. § 10), les éléments structurants de cette évolution et de ses conséquences sur le site de Meuse / Haute-Marne. Etant donné les temps caractéristiques des phénomènes géodynamiques (de 100 000 ans pour les cycles climatiques, à plusieurs centaines de milliers d'années pour les modifications de la morphologie de surface), cette synthèse est orientée sur les effets de ces évolutions en terme de conséquences sur le transfert des radionucléides et des toxiques chimiques dans les formations géologiques et les environnements de surface.

### 9.7.1 La couche du Callovo-Oxfordien

Les impacts sont faibles. La profondeur de la couche place celle-ci hors d'atteinte des phénomènes thermiques, mécaniques ou chimiques induits par les évolutions géodynamiques. Les caractéristiques physiques et chimiques du Callovo-Oxfordien, notamment vis-à-vis du transport des radionucléides et toxiques chimiques, restent donc pérennes dans le temps (Figure 9.7.1). Sur le plan hydraulique, les évolutions des charges des formations encaissantes (voir ci-dessous) modifient progressivement, sur le prochain million d'années, les conditions aux limites de la couche. Ainsi, le gradient de charge vertical au travers de celle-ci passe de 0,2/0,3 m.m<sup>-1</sup> au maximum à l'actuel sur la zone de transposition à 0,4/0,5 m.m<sup>-1</sup> à un million d'années. Cette modification progressive, qui ne deviendra sensible que vers 500 000 ans, reste cependant mineure et le phénomène de diffusion reste toujours le mode de transfert dominant dans le Callovo-Oxfordien sur toute la période.

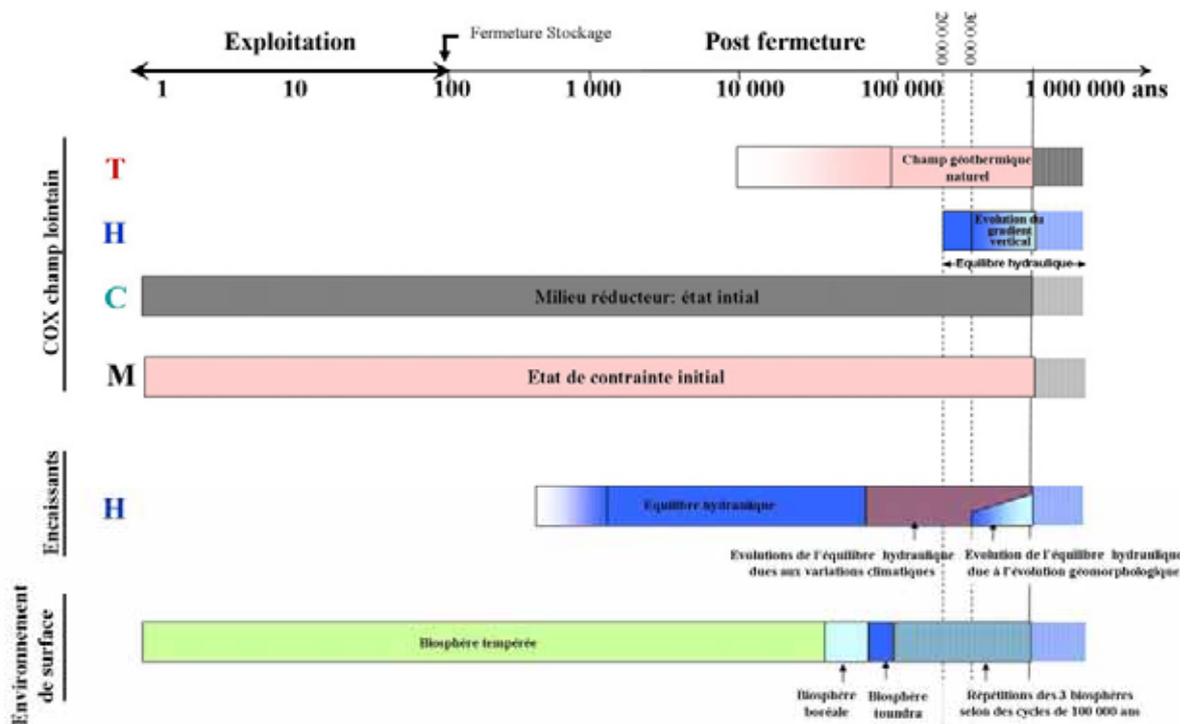


Figure 9.7.1 Chronogramme des effets des évolutions géodynamiques sur le milieu géologique et l'environnement de surface (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage)

### 9.7.2 Les formations encaissantes

Contrairement au Callovo-Oxfordien, les conséquences des phénomènes géodynamiques sur les transferts de solutés dans les encaissants de la couche (Dogger et Oxfordien carbonaté) sont plus marquées (Figure 9.7.1).

D'une manière générale, les cycles glaciaires successifs de 100 000 ans induisent des perturbations transitoires et réversibles. Lors des périodes de maximum glaciaire, Un pergélisol, plus ou moins continu, se développe en surface et l'isotherme 0 °C pénètre jusqu'à une profondeur d'environ 300 m. Ce pergélisol bloque les infiltrations aux affleurements. Il est également susceptible, en profondeur et au niveau du site de limiter les écoulements dans les aquifères les plus superficiels (aquifères de surface – Calcaires du Barrois et intervalles carbonatés du Kimméridgien- mais également niveaux poreux supérieurs de l'Oxfordien carbonaté). Le phénomène d'exclusion des sels lors du gel provoque une concentration progressive de ceux-ci au front du pergélisol, vers 35 mètres de profondeur en moyenne, soit bien au-dessus du toit de l'Oxfordien carbonaté sur la zone de transposition. Ces phénomènes se développent sur des durées courtes, environ 20 000 ans au sein d'un cycle de 100 000 ans, qui restent faibles en regard des temps de transfert dans les encaissants (plusieurs centaines de milliers d'années). Leur impact est donc limité.

Les prochains cycles glaciaires peuvent potentiellement être perturbés, dans leur durée et leur amplitude, par les activités anthropiques (émission massives de gaz à effet de serre) dans les scénarios extrêmes. Cette perturbation peut empêcher le retour de conditions glaciaires sur le site pour les prochaines 200 000 à 300 000 ans et perturberait l'amplitude des cycles suivants jusqu'à 500 000 / 600 000 ans. Pour ces durées, le transfert des radionucléides et des toxiques chimiques n'est pas susceptible d'être perturbé par ces transitoires, dans le cas d'une perturbation anthropique. Au-delà de 600 000 ans, les effets de la perturbation anthropique sur les cycles climatiques ne seraient plus significatifs.

À l'échelle du million d'année, l'enchaînement des cycles climatiques entraîne l'évolution géomorphologique du paysage. Cette évolution conduit à une modification significative du champ de charge de l'Oxfordien carbonaté. En effet, la mise à l'affleurement de certaines parties de cette formation en fond de vallée dans des zones à l'aval des écoulements fait migrer les exutoires actuels (Vallée de la Marne) ou en fait apparaître de nouveaux (vallée de l'Ormain). Ces perturbations du champ de charge font ainsi disparaître, à l'horizon du million d'année, la direction d'écoulement régionale vers le centre du bassin, existant à l'actuel. Ces modifications progressives deviennent sensibles à partir de 500 000 ans. Le Dogger carbonaté est moins sensible à cette évolution car plus éloigné des affleurements et, à l'échelle du prochain million d'années, les transferts dans cette formation restent donc très semblables à l'actuel.

### 9.7.3 Les environnements de surface

Les évolutions climatiques imposent une alternance de biosphères tempérées et froides (boréales, puis tundra) selon des périodes de l'ordre de la centaine de milliers d'années (Figure 9.7.1).

Par rapport à l'état initial, le passage à des biosphères froides provoque le gel d'abord saisonnier (climat boréal), puis permanent (climat de type tundra) du sous-sol des plateaux. La restriction de la ressource en eau ne permet plus le développement de vastes zones cultivées sur ces plateaux. Le transfert des radionucléides et des toxiques chimiques, à partir de la nappe des Calcaires du Barrois y devient alors très limité.

Durant les périodes froides, les cultures se localisent surtout dans les zones de vallées, ou à proximité. Les exutoires alimentant les rivières, peuvent en effet y rester pérennes. Les sols sont néo-formés à

chaque cycle climatique dans ces zones, le dégel en sortie de saison froide augmentant les débits des rivières et déstabilisant les terrasses alluviales. Les vallées apparaissent donc comme les seuls endroits où des transferts vers la biosphère restent possibles en période froide, plus particulièrement en période boréale.

Dans les dépressions marneuses, le froid ralentit les évolutions des sols qui se chargent en matière organique. Tourbières et marécages se développent alors.

Dans le cas d'une perturbation anthropique importante des cycles climatiques, la biosphère tempérée actuelle reste prédominante durant les prochains 300 000 ans, ne permettant un développement significatif de biosphères boréales qu'au-delà et de conditions de maximum glaciaires qu'après 600 000 ans



# 10

## Le relâchement et le transfert des radionucléides

---

<b>10.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>431</b>
<b>10.2</b>	<b>Le relâchement des radionucléides par les colis de déchets .....</b>	<b>433</b>
<b>10.3</b>	<b>Le transfert des radionucléides dans les ouvrages du stockage.....</b>	<b>443</b>
<b>10.4</b>	<b>Le transfert des radionucléides en solution dans la couche du Callovo-Oxfordien depuis le stockage vers les formations encaissantes .....</b>	<b>457</b>
<b>10.5</b>	<b>Le transfert des radionucléides en solution dans les formations encaissantes .....</b>	<b>465</b>
<b>10.6</b>	<b>Le transfert des radionucléides vers la biosphère et l'homme.....</b>	<b>471</b>
<b>10.7</b>	<b>Synthèse sur le relâchement et le transfert des radionucléides.....</b>	<b>480</b>



## 10.1 Introduction

Le relâchement puis le transfert des radionucléides sont des processus se déroulant sur plusieurs centaines de milliers d'années *a minima*. Ils font l'objet de modélisations et de simulations numériques dans le cadre de l'analyse de sûreté d'un stockage en formation géologique profonde. Les paramètres et les modèles utilisés dérivent des caractéristiques propres des éléments concernés (diffusion, rétention, solubilité principalement), mais également du cadre THM dans lequel le relâchement et le transfert s'effectuent. Dans le présent chapitre, ces processus sont essentiellement décrits pour les radionucléides. On présentera également, le cas échéant, le comportement des toxiques chimiques présentant potentiellement de l'importance compte tenu de leur teneur et de leur toxicité (Albrecht & Gallerand, 2005) : le bore, l'antimoine, le nickel, le sélénium et l'uranium (Encadré 10.1).

### 10.1.1 Le relâchement et le transfert des radionucléides : des phénomènes pilotés par l'évolution du stockage

Le relâchement et le transfert des radionucléides sont conditionnés par l'évolution phénoménologique des ouvrages du stockage et de leur environnement (champ proche et champ lointain). C'est pourquoi, ils sont abordés après avoir rappelé les évolutions espace-temps de l'ensemble des processus phénoménologiques affectant le stockage et son environnement géologique.

- Le relâchement est engendré par la dégradation des différents colis de déchets B, de déchets C et de combustibles usés. Cette dernière est la résultante des conditions physico-chimiques dans les alvéoles, notamment les perturbations thermique et hydraulique qui conditionnent en partie les phénomènes chimiques tels que la corrosion des (sur)conteneurs ou la dégradation des bétons. En outre, ces conditions pilotent la dégradation des matrices de déchets, à l'exemple de la dissolution aqueuse du verre qui provoque le relâchement progressif des radionucléides.
- Le relâchement et le transport s'effectuent après que les températures sont inférieures à 50 °C pour les colis de déchets C et les colis de combustibles usés.
- Pour les déchets C et les combustibles usés, le relâchement des radionucléides débute après la rupture des conteneurages. On rappelle que la durée d'étanchéité visée par conception est de 4 000 ans pour les déchets C et 10 000 ans pour les combustibles usés. Pour les déchets B, ce relâchement s'amorce après quelques centaines à quelques milliers d'années en fonction de la nature des déchets et de l'état de saturation des colis.
- Dans le stockage et dans le Callovo-Oxfordien, le transfert des radionucléides est piloté par la diffusion. La mobilité des radionucléides dépend de leur solubilité et de leur rétention au sein du stockage et des argilites.
- Dans les encaissants sous-jacents et sus-jacents, le transfert des radionucléides – pour ceux qui atteindraient ces formations - est principalement dominé par la convection dans la direction horizontale et à un moindre degré par la dispersion-diffusion dans la direction verticale.

### 10.1.2 L'organisation du chapitre sur le relâchement et le transfert des radionucléides

Le chapitre s'organise autour de deux grandes parties.

- La première partie concerne le relâchement des radionucléides en lien avec l'évolution des colis de déchets et en particulier la dégradation des déchets et des matrices de conditionnement.

On s'intéresse particulièrement aux processus de précipitation et de co-précipitation au voisinage des déchets comme par exemple dans les produits de dégradation des matrices vitreuses.

- La seconde partie traite du transfert des radionucléides en suivant leur migration depuis les colis de déchets, dans le stockage, les argilites du Callovo-Oxfordien et enfin dans les encaissants.

Le transfert des radionucléides dans les alvéoles est piloté par les processus de solubilisation dans les eaux interstitielles et de sorption sur les différents matériaux des alvéoles. Ce transfert dépend des types d'alvéole considérés et de leurs caractéristiques physico-chimiques.

Dans le champ lointain, les conditions hydrauliques et physico-chimiques des argilites sont stables et similaires à celles décrites dans le chapitre consacré à l'état initial. Ces conditions pilotent le transfert des radionucléides dans la couche du Callovo-Oxfordien. En revanche, on traite des évolutions des argilites en champ proche susceptibles d'influencer les mécanismes et les cinétiques de transfert des radionucléides. Pour les radionucléides qui atteindraient les encaissants, on tient compte, dans l'évaluation de leur transfert, des conséquences hydrogéologiques de l'évolution géodynamique.

### *Encadré 10.1 Les toxiques chimiques*

L'inventaire des éléments chimiques des colis de déchets B, de déchets C et de combustibles usés met en évidence d'une part la présence de radionucléides, mais également d'éléments non radioactifs présentant une certaine toxicité pour l'homme. Un recensement des toxiques chimiques présents dans les déchets B, les déchets C et les combustibles usés conduit aux composés suivants : As, B, Be, Cd, Cr<sub>total</sub>, Cr (VI), CN<sup>-</sup>, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, U et l'amiante. Dans les conditions du stockage, cinq toxiques chimiques présentent potentiellement de l'importance compte tenu en particulier de leur teneur et de leur toxicité : le bore, l'antimoine, le nickel, le sélénium et l'uranium. Parmi eux, trois sont aussi présents en tant que radioéléments ; il s'agit du nickel, du sélénium et de l'uranium.

Le caractère de toxique chimique est défini selon plusieurs critères correspondant à l'évaluation de leur dangerosité : effet cancérigène et systémique pour les voies de contamination par ingestion et inhalation. L'étude de ces paramètres selon la démarche préconisée par l'INERIS pour les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) a conduit l'Andra à proposer une liste de base : As, B, Be, Cd, Cr<sub>total</sub>, Cr (VI), CN<sup>-</sup>, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, U et l'amiante.

Ces éléments sont caractérisés par une Valeur Toxicologique de Référence (VTR) pour les voies par ingestion et/ou inhalation, pour des effets cancérigènes et/ou non cancérigènes (Albrecht & Gallerand, 2005).

Les quantités totales (en tonnes) de certains de ces toxiques chimiques dans l'ensemble des déchets B, des déchets C et des combustibles usés, en fonction des différents scénarios de stockage, sont regroupées dans le tableau suivant (Andra, 2005d). Dans les colis de déchets du stockage ou dans les assemblages de combustibles usés, il n'y a pas de Cr (VI), d'ions cyanures libres ou d'amiante.

Toxiques de la liste de base	S1a	S1b	S1c	S2
<b>Antimoine</b>	10,58	10,7	10,78	8,85
<b>Arsenic</b>	0,16	0,17	0,17	0,17
<b>Bore</b>	656,35	665,33	771,20	311,31
<b>Nickel</b>	2769,22	2722,66	2800,16	2031,49
<b>Sélénium</b>	3,15	3,4	4,01	3,52
<b>Uranium</b>	299,59	2451,43	2455,13	32154,03

## 10.2 Le relâchement des radionucléides par les colis de déchets

Le relâchement des radionucléides est lié à la nature du déchet et à l'environnement immédiat (chimie des eaux, conditions redox, produits de corrosion,...).

L'évolution des colis de déchets et notamment des matrices de confinement a été décrite dans les chapitres traitant de l'évolution chimique et de l'évolution mécanique. On n'en rappellera ici que les éléments généraux et on se focalisera sur le lien entre la dégradation des colis et le relâchement des radionucléides afin notamment de fixer les temps caractéristiques des processus mis en jeu. Le comportement des radionucléides relâchés en solution ou sous forme gazeuse sera traité dans le paragraphe consacré aux ouvrages du stockage (cf. § 1.3).

### 10.2.1 Les colis de déchets C

Dans les alvéoles de déchets C, le relâchement des radionucléides débute après que le chemisage et le surconteneur ont perdu leur étanchéité, soit au-delà de 4 000 ans environ après la mise en place des colis dans le stockage. Sur la base d'évaluations purement phénoménologiques et plus particulièrement en prenant en compte l'instauration rapide de conditions anoxiques dans les alvéoles de déchets C, la durée d'étanchéité des surconteneurs pourrait être portée à 15 000 ans. Par cohérence avec les hypothèses retenues dans les tomes portant sur les architectures de stockage et sur l'évaluation de sûreté (Andra, 2005i ; Andra, 2005j) on retient dans les paragraphes qui suivent une durée prudente d'étanchéité de 4 000 ans.

La dégradation des matrices vitreuses des colis types C0 s'inscrit sur une échelle de temps de quelques milliers d'années et celle des colis types C1, C2, C3, C4 sur une échelle de temps de quelques centaines de milliers d'années (Figure 10.2.1). Les radionucléides des différents colis de déchets C (Andra, 2005e) sont répartis de façon homogène dans la structure des matrices vitreuses. La dégradation de ces matrices se caractérise par la formation de produits d'altération, gel (*i.e.* pellicule d'altération) et minéraux (cf. § 7.3.4). Ceux-ci peuvent entraîner le piégeage par sorption, précipitation et co-précipitation d'une partie des radionucléides relâchés par le verre lors de sa dissolution (Encadré 10.2). C'est le cas en particulier des actinides qui, à la différence d'autres éléments comme par exemple le technétium et le bore, ne sont pas relâchés de manière congruente à la dissolution du verre.

#### *Encadré 10.2    Le comportement des radionucléides dans les produits d'altération des verres*

L'étude des processus de dissolution du verre (Encadré 7.7, Encadré 7.8) a permis de mettre en évidence les processus de rétention des éléments relâchés par le verre dans ses produits de dégradation (Andra, 2005d ; Fillet, 1987).

Il est ainsi possible de classer les différents éléments relâchés par le verre en fonction de leur rétention dans la pellicule d'altération et les autres produits d'altération (Andra, 2005d).

Les **éléments mobiles** sont les éléments qui ne sont pas retenus dans la pellicule d'altération. Ils comprennent les alcalins (sodium, lithium), le molybdène et le technétium. Ils sont relâchés de manière congruente avec la dégradation de la matrice vitreuse (Andra, 2005d). Parmi les toxiques chimiques, le bore correspond à cette catégorie d'éléments.

- Dans le cas du molybdène et du technétium, leur rétention est possible et dépend des conditions redox dans la pellicule d'altération. En milieu oxydant ou faiblement réducteur, ces deux éléments ne sont pas retenus dans la pellicule d'altération si ce n'est à un très fort avancement de la réaction (~ 10 %). Par contre, lorsque les conditions sont fortement réductrices ( $E_h < -400$  mV), le changement du degré d'oxydation de ces éléments conduit à la formation d'espèces moins solubles qui restent partiellement piégées dans la pellicule d'altération.

- Le sodium et le lithium ne sont généralement pas retenus par la pellicule d'altération, sauf en tant que compensateurs de charge (Munier *et al.*, 2004). C'est également le cas du bore.

Les **éléments dits intermédiaires** sont retenus partiellement dans la pellicule d'altération lors de la dégradation des verres. Ces éléments sont le césium, les alcalino-terreux (calcium, strontium, baryum), le silicium et l'aluminium (Andra, 2005d).

- Le césium se comporte plutôt comme un alcalino-terreux et lorsque la dégradation est avancée, il est retenu de façon notable dans la pellicule d'altération (~ 30 % - 60 %) ou dans les phyllosilicates (Valle, 2001).
- La rétention des alcalino-terreux dans la pellicule d'altération varie entre 40 % et 60 %. Ils servent probablement de compensateurs de charge à l'aluminium ou au zirconium.
- La rétention du silicium et de l'aluminium dans la pellicule d'altération varie en fonction des conditions d'altération et, en conditions statiques avec de forts rapports surface / volume, la rétention du silicium peut atteindre près de 95 %. L'aluminium est plus retenu que le silicium, peut-être du fait de sa plus faible solubilité aux pH basiques.

Les **éléments fortement retenus** sont ceux qui sont insolubles aux pH basiques imposés par la dégradation du verre. Ils rassemblent tous les éléments de transition (fer, nickel, zinc, zirconium,...) ainsi que les lanthanides et les actinides (Andra, 2005d ; Fillet, 1987).

- D'une manière générale, La, Ce, Nd, Th, Am et Cm sont présents sous la forme +III (Andra, 2005d) et cette charge favorise une forte attraction avec la pellicule d'altération chargée négativement. La rétention des actinides est plus ou moins importante en fonction des éléments. L'américium et le curium sont retenus à près de 99,9 %.
- L'uranium et le neptunium ont un comportement proche l'un de l'autre et sont plus mobiles que les autres actinides, surtout en milieu oxydant où ils sont sous les formes  $U^{VI}$  et  $Np^V$ . En milieu réducteur, le neptunium IV est moins mobile. Il peut être retenu de façon significative (~ 35 %) en fonction de la nature du verre (Andra, 2005d). En présence de phosphates, la rétention du neptunium dans la pellicule d'altération peut atteindre 90 % (Andra, 2005d ; Andra, 2005g).

Le plutonium a un comportement intermédiaire entre les lanthanides et l'uranium. Dans certains cas, il peut être très fortement retenu (> 99 %) dans la pellicule d'altération par des phases plus stables que de simples hydroxydes ou carbonates (Andra, 2005d).

### 10.2.2 Les colis de combustibles usés

La durée d'étanchéité des conteneurs de combustibles usés est de 10 000 ans. Comme dans le cas des surconteneurs de déchets C, l'évaluation purement phénoménologique a conduit à estimer que cette durée pouvait être portée à 30 000 ans. Pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment, c'est sur la base d'une étanchéité de 10 000 ans que le comportement des combustibles usés sera décrit dans les paragraphes qui suivent. L'arrivée de l'eau au contact des pastilles d'oxydes dans les crayons de combustibles usés suppose la perte d'étanchéité des gaines des crayons. Cette perte d'étanchéité peut survenir dès l'arrivée d'eau dans les colis, par fissuration et/ou par fluage et rupture.

Les combustibles usés rassemblent deux grands types de déchets : les matériaux de structure (gaines, embouts, grilles et ressorts métalliques) et les pastilles d'oxydes. Les radionucléides se répartissent entre ces deux ensembles. Toutefois, pour certains radionucléides comme l'iode, une fraction de leur inventaire est localisée en dehors des matériaux de structure ou des grains d'oxydes constituant les pastilles de combustibles usés. Le relâchement de cette fraction de l'inventaire radiologique est possible dès l'arrivée d'eau (fraction dite labile). Pour les autres radionucléides, leur relâchement est

conditionné par les cinétiques de corrosion et de dissolution. On considère que leurs répartitions sont homogènes dans les pastilles d'oxydes d'une part et dans les éléments de structure d'autre part.

### 10.2.2.1 Le relâchement des radionucléides par les matrices d'oxydes

De manière schématique, on peut distinguer deux mécanismes d'importance inégale contribuant au relâchement des radionucléides contenus dans les matrices d'oxydes : la diffusion accélérée par l'auto-irradiation alpha (D3AI) et la dissolution avec ou sans effet de la radiolyse de l'eau (Andra, 2005d).

Le processus de diffusion accélérée par l'auto-irradiation alpha (D3AI), initié lors du passage en réacteur, n'aurait de conséquences significatives sur la répartition des radionucléides que pendant quelques milliers d'années, soit avant la rupture des conteneurs. Au moment de la perte d'étanchéité du conteneur, cela correspondrait au maximum à une migration hors des grains de moins de 5 % de l'inventaire initialement présent. Toutefois, ce phénomène affecterait très peu les radionucléides lourds comme les actinides, mais plutôt les radionucléides légers et mobiles comme  $^{129}\text{I}$ .

La structure intime des pastilles d'oxydes est complexe et constituée de grains, de fissures / fractures et de joints. Les radionucléides se distribuent dans les grains, à leur surface ou dans la porosité des pastilles (joint de grains, fissures, fractures). Cette répartition varie suivant le radionucléide considéré. La fraction totale de l'inventaire localisée hors des grains et dans les vides des crayons représente globalement de l'ordre de 5 % pour les combustibles usés CU1 et de 30 à 35 % pour les combustibles usés CU2.

Le relâchement sera fortement dépendant de la localisation au sein ou à la périphérie des grains. Il peut débuter dès la rupture du conteneur soit 10 000 ans après sa mise en place dans l'alvéole.

Le relâchement des radionucléides localisés dans les vides (gap et plenum) et à la surface des grains (joint de grain...) directement accessible lors de l'arrivée d'eau dans le colis (*i.e.* les crayons de combustibles usés), est instantané. La fraction est variable en fonction des radionucléides et du taux de combustion.

Le relâchement des radionucléides situés à la surface des grains non connectée avec la surface externe de la pastille d'oxydes ou à distance des fissures / fractures connectées avec la surface externe des pastilles, dépendra de la modification progressive de la structure par la dissolution des grains (accessibilité progressive à l'eau par la dissolution des grains).

Le relâchement des radionucléides localisés à l'intérieur des grains, notamment les actinides, est lié à la dissolution de ces derniers. En l'état actuel des connaissances, ce relâchement est congruent à cette dissolution.

La prise en compte de la radiolyse de l'eau par le rayonnement  $\alpha$  sur la dissolution des grains d'oxydes conduit à une durée de dissolution totale des pastilles, donc de relâchement des radionucléides, de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'années à la centaine de milliers d'années en fonction du taux de combustion des combustibles usés (cf. § 10.2.3). Ce mode de relâchement n'est pas dépendant de la température. Un débat scientifique existe quant à la réalité de ce processus dans les conditions de stockage. En particulier, la décroissance du rayonnement  $\alpha$  et la présence d'hydrogène (issu de la corrosion des aciers) au contact direct des colis sont des éléments évoqués pour minimiser l'importance de ce processus dans la dissolution des pastilles d'oxydes (Spahiu *et al.*, 2004).

En l'absence d'un effet de la radiolyse de l'eau sur la dissolution des grains d'oxydes, la durée de dissolution totale des pastilles serait supérieure au million d'années (Figure 10.2.1). Elle est alors pilotée par (i) les faibles solubilités de l'uranium et du plutonium, déterminées par les phases solides stables de ces deux éléments dans les conditions physico-chimiques des alvéoles, (ii) les masses totales

des pastilles d'oxydes d'uranium et de plutonium et, (iii) les conditions de transport en solution de ces deux éléments caractérisées par des sorptions élevées et une diffusion dominante. Au moment de la perte d'étanchéité du conteneur, la température au contact des colis a suffisamment décreu pour ne pas influencer significativement la dissolution des pastilles d'oxydes.

### 10.2.2.2 Le relâchement des radionucléides par les matériaux de structure

Comme pour les pastilles d'oxydes, la répartition des radionucléides varie entre les différents matériaux de structure. Leur localisation au sein des matériaux varie elle aussi. Elle est homogène pour les éléments de structure des assemblages. En revanche, dans les gaines, si les produits d'activation sont répartis de manière homogène, les produits de fission sont implantés par recul et sont principalement localisés en surface interne des gaines, dans la couche de zircone sur quelques micromètres.

Les radionucléides localisés à la surface des gaines en zircaloy et des matériaux de structure en acier inoxydable et en inconel sont relâchés immédiatement avec l'arrivée de l'eau.

Les radionucléides présents dans les gaines en zircaloy et dans les matériaux de structure sont relâchés de manière congruente avec la corrosion des gaines, des aciers inoxydables et des inconels (cf. § 10.2.3) sur des durées au plus de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'années (Figure 10.2.1) en fonction de la géométrie des pièces. Ces évaluations tiennent compte de la température atteinte dans les colis au moment du relâchement.

#### *Encadré 10.3 La localisation et la répartition des radionucléides dans les assemblages de combustibles usés*

Les radionucléides présents dans les combustibles usés (Encadré 7.9, Encadré 7.11) (Andra, 2005e) se répartissent entre les pastilles d'oxydes et les matériaux de structure (aciers inoxydables et alliages). Les produits de fission sont essentiellement localisés dans les pastilles d'oxydes et les produits d'activation dans les matériaux de structure. Cependant, la répartition de certains produits d'activation peut être hétérogène. Par exemple, seulement quelques pourcents de  $^{93}\text{Zr}$  ou  $^{121\text{m}}\text{Sn}$  se trouvent dans les matériaux de structure alors que cette proportion atteint plus de 90 % pour  $^{59}\text{Ni}$  ou  $^{63}\text{Ni}$  (Andra, 2005d).

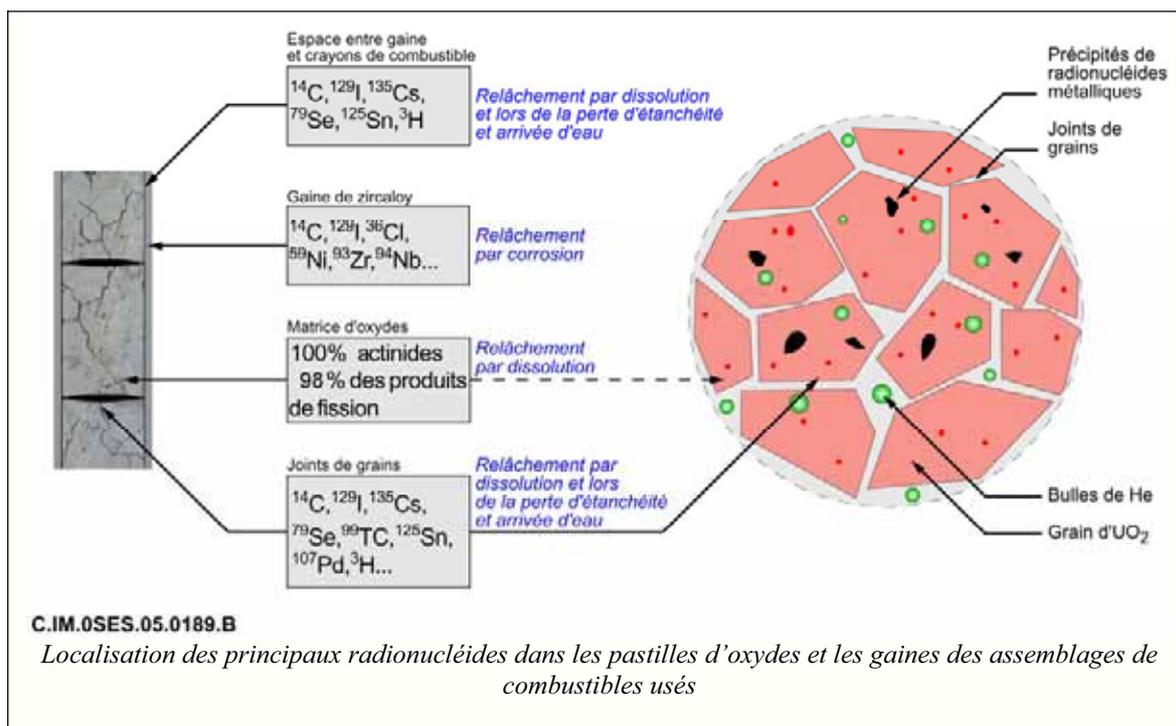
Au sein des pastilles, les radionucléides se répartissent en cinq catégories en fonction de leur forme chimique (Andra, 2005d) :

- les radionucléides solubles dans grains d'oxydes (*i.e.* formant des solutions solides) : les actinides, les lanthanides, les produits de fission solubles sous forme d'oxydes (Zr, Nb, Sr),
- les radionucléides formant des précipités d'oxydes : Cs, Zr, Nb, ...,
- les radionucléides formant des précipités métalliques : Mo, Tc, Ru, Rh, ...,
- les métalloïdes sous forme de précipités (Ge, As, Se),
- les gaz de fission : gaz rares (Kr, Xe, He) et produits de fission volatils en réacteur (I, Cs, Se, Te, Br).

L'essentiel des radionucléides (environ 95 %) appartient à la première catégorie.

Le processus de diffusion accélérée par l'auto-irradiation alpha (D3AI) entraîne la migration de certains éléments mobiles (iode, tellure, brome, gaz rares et césium essentiellement), qui peuvent se trouver relâchés dans les vides des crayons, dans les zones intergranulaires (joints de grain et pores) ou rester dans les grains d'oxydes (Figure ci-dessous, Andra, 2005d).

Les produits de fission mobiles se trouvent probablement dans la porosité des zones restructurées (« rim » ou amas de Pu). Les éléments très peu solubles comme les actinides et les lanthanides restent dans les grains. Les précipités métalliques s'accumulent préférentiellement aux joints de grain.



### 10.2.3 Les colis de déchets B

Les colis de déchets B contiennent des déchets d'origine et de géométrie variables. Ils sont conditionnés suivant trois principaux modes : la cimentation, le bitumage et le compactage. À ce titre, ils présentent vis-à-vis du relâchement des radionucléides des comportements spécifiques.

La resaturation des colis de déchets B dépend fortement du conditionnement des déchets dans les colis primaires. De plus, au sein d'une même alvéole, la resaturation ne se produit pas de façon homogène. Ainsi, avant resaturation complète ( $S > 97\%$  à 200 000 ans), la présence d'eau condensée au sein de l'alvéole, et en particulier au sein des colis primaires, dépend de la localisation du colis au sein de l'alvéole (cf. § 6.3.2.6 et Figure 6.3.14). Par conséquent, à l'intérieur d'une même alvéole, les temps marquant le début du relâchement des radionucléides pourront varier suivant la localisation des colis et des déchets. Cette hétérogénéité du relâchement devrait principalement se produire lorsque l'alvéole est proche de la saturation totale. Elle n'est pas de nature à créer des différences significatives de relâchement par les colis à l'échelle de l'alvéole.

En terme d'hygrométrie, on notera que la resaturation des alvéoles de déchets B correspond à une montée rapide et homogène de l'hygrométrie qui atteindrait environ 90 % en quelques centaines à quelques milliers d'années. Indépendamment de la présence d'eau condensée, une telle hygrométrie est de nature à permettre la corrosion des métaux et la dégradation de certains déchets (cf. § 7.4), en particulier les déchets compactés (colis types B1, B5 et B6) et les colis de boues bitumées B2.

#### 10.2.3.1 Le relâchement des radionucléides par les colis types B2 de boues bitumées

Les radionucléides sont majoritairement localisés au niveau des sels solubles et des sels faiblement solubles (dits « insolubles ») enrobés dans la matrice bitume (Andra, 2005e). La répartition des radionucléides entre les différents sels varie, bien que ceux-ci sont majoritairement associés aux sels « insolubles ». Il en va de même pour la forme chimique des radionucléides : sous forme sorbée à la surface des sels, sous forme occluse dans les sels,... Quoi qu'il en soit, le relâchement des radionucléides par les colis de boues bitumées suit l'arrivée d'eau au sein de l'enrobé bitumineux.

L'eau peut rentrer à l'intérieur de l'enrobé si celui-ci est au contact d'eau liquide ou se trouve dans une atmosphère à humidité relative supérieure à 70 %. L'évolution hydraulique d'une alvéole de déchets B montre que cette dernière condition devrait être atteinte en quelques centaines à quelques milliers d'années. Dès cette période, le relâchement de radionucléides est donc possible. L'eau pénètre progressivement dans l'enrobé par diffusion, permettant la dissolution progressive des sels. Schématiquement, il se forme ainsi un front de pénétration de l'eau et un front de dissolution des sels, d'abord les sels solubles, puis les sels dits insolubles. La dissolution des sels crée ainsi une zone dite perméable en arrière des fronts de pénétration de l'eau et de dissolution des sels. L'arrivée d'eau et la dissolution des sels permettent la mise en solution des radionucléides correspondants. Ils peuvent alors diffuser hors de l'enrobé, en sens inverse de la pénétration de l'eau et de la dissolution des sels, dans la zone perméable, puis atteindre la surface de l'enrobé et être relâchés hors du colis primaire (Andra, 2005d) (Encadré 7.14) (cf. § 7.4). Les modélisations de la pénétration de l'eau et de la dissolution des sels montrent que la durée nécessaire à une reprise d'eau complète théorique par les enrobés est de l'ordre du million d'années. Néanmoins, ces modélisations présentent des incertitudes, en particulier concernant les conditions de transfert des sels dissous dans la zone perméable formée, d'où l'évaluation plus robuste et enveloppe de 10 000 ans présentée au § 7.4.3.3 dans laquelle l'insolubilisation des sels est négligée (Figure 10.2.1). Il en va de même pour le relâchement des radionucléides.

### 10.2.3.2 Le relâchement des radionucléides par les colis types B4 et B5

Le relâchement des radionucléides associés aux déchets des colis types B4 et B5 dépend de la localisation de chaque radionucléide dans ces déchets (Andra, 2005d ; Andra, 2005e) et varie selon l'origine du déchet. Ainsi, par exemple pour les déchets technologiques, la contamination est généralement surfacique alors que, pour les déchets de structure, les radionucléides sont plutôt inclus dans le matériau lui-même.

Les colis de coques et embouts (colis types B4 et B5) rassemblent deux types de déchets : déchets de structure (coques en zircaloy, ressorts et grilles en inconel, embouts en acier inoxydable) et déchets technologiques divers (en acier inoxydable, zircaloy,...) (Encadré 10.4).

Le relâchement des radionucléides situés en surface des matériaux métalliques (contamination, résidus,...) s'effectue par des processus de dissolution / précipitation dès l'arrivée de l'eau liquide au contact des déchets. Il dépend donc directement de l'état physico-chimique de l'élément et des conditions d'environnement des déchets (milieu cimentaire sain et réducteur).

Pour les radionucléides localisés dans la masse des matériaux (*i.e.* les produits d'activation), leur relâchement est piloté par la dégradation du matériau qui fait office de matrice de confinement.

La corrosion du zircaloy est très lente en milieu cimentaire, du fait de la formation d'une couche passivante de zircone. Les radionucléides qu'il contient sont essentiellement des produits d'activation, répartis de façon homogène dans toute l'épaisseur des coques. Leur relâchement n'est cependant pas forcément congruent à la corrosion de l'alliage du fait de la présence de la couche de zircone en surface interne et externe des coques (Andra, 2005d). Cette couche de zircone contient également des radionucléides dont le relâchement n'est pas congruent à sa dissolution (formation de précipités secondaires, formation d'une couche passivante, diffusion, migration par des chemins préférentiels,...). Il est ainsi nécessaire de prendre en considération d'une part la corrosion du zircaloy et d'autre part la dissolution de l'oxyde de zirconium (zircone) et la migration des radionucléides au sein de la zircone. Globalement, dans les conditions cimentaires d'une alvéole de déchets B, les cinétiques de corrosion du zircaloy sont lentes, de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $2 \cdot 10^{-3} \mu\text{m.an}^{-1}$  (Andra, 2005d). Dans l'éventualité d'un transitoire oxydant dû aux colis irradiants, ce dernier est de très courte durée (quelques dizaines à quelques centaines d'années) et n'influence pas le relâchement des radionucléides. Les vitesses de corrosion de l'inconel et des aciers inoxydables sont de  $10^{-2}$  à  $10^{-4} \mu\text{m.an}^{-1}$  (cf. § 7.4).

Si l'on admet la congruence du relâchement des radionucléides avec la corrosion des métaux (Andra, 2005d), le relâchement total des radionucléides s'effectuerait sur 15 000 ans pour l'inconel, 70 000 ans pour les aciers inoxydables et environ 100 000 ans pour les gaines en zircaloy (cf. § 7.4) (Figure 10.2.1).

### 10.2.3.3 Le relâchement des radionucléides par les autres déchets métalliques

Les autres déchets B (hors colis B4 et B5) contiennent également de nombreux déchets métalliques, en particulier des déchets de structure activés (colis types B1, B6.2, B6.3,...) et des déchets technologiques (colis types B3, B6.1, B6.4, B6.5,...) (Andra, 2005d). Comme pour les déchets des colis types B4 et B5, les radionucléides sont localisés soit en surface, soit dans la masse métallique.

Ceci peut être illustré sur les trois exemples suivants.

- ✓ L'activité des déchets activés des colis types B1 est localisée dans les différents composants (grappes poisons, grappes de commande et déchets métalliques divers) regroupés dans ces déchets. Les produits d'activation, par nature, sont répartis dans la masse des matériaux (Andra, 2005d). Le relâchement des radionucléides s'effectue de la même façon que celle décrite ci-dessus pour les produits d'activation des déchets B4 et B5.
- ✓ Les déchets activés des colis types B6.2 et B6.3 sont constitués d'acier inoxydable, d'aluminium et de magnésium. Les produits d'activation sont répartis de façon homogène dans la masse de ces déchets. Le relâchement de ceux situés dans les déchets en acier inoxydable est semblable à celui décrit pour les déchets de coques et embouts. Ceux localisés dans les déchets en aluminium et en magnésium sont très certainement relâchés avec la corrosion de ces matériaux.
- ✓ Dans de très nombreux cas, en particulier pour les déchets technologiques en acier noir (colis types B3, B6.1, B6.4, B6.5,...), la contamination est superficielle. Le relâchement des radionucléides s'effectue dès l'arrivée d'eau liquide.

Pour l'essentiel de ces déchets, on retrouve des échelles de temps similaires à celles décrites pour les colis types B4 et B5.

### Encadré 10.4 La localisation et la répartition des radionucléides dans les déchets de types B4 et B5

Les colis types B4 et B5 rassemblent deux types de déchets : des déchets de structure (coques en zircaloy, ressorts et grilles en inconel, embouts en acier inoxydable) et des déchets technologiques divers (en acier inoxydable, zirconium, zircaloy, inconel, molybdène,...) (Andra, 2005d) (cf. Figure ci-dessous).

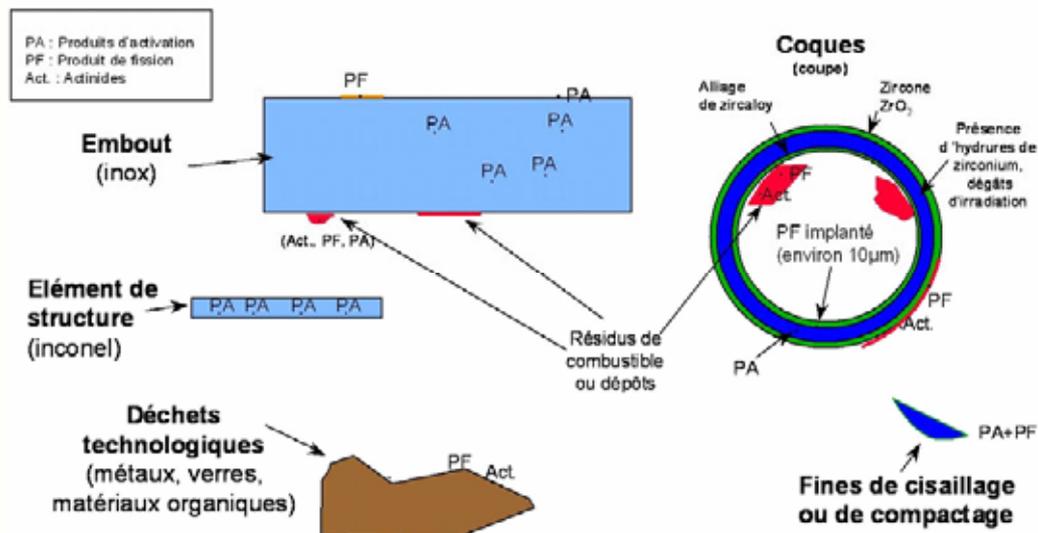
**Les produits d'activation des déchets de structure** sont répartis dans la masse des matériaux. L'inventaire dépend des teneurs en impuretés et en éléments des alliages considérées pour les différents matériaux. En ce qui concerne les composants en zircaloy, environ 20 % des produits d'activation sont localisés dans la couche de zircone. Une partie des produits d'activation du combustible est également exprimée sous forme d'une contamination de surface des déchets.

**Les produits de fission** se retrouvent en surface des déchets de structure après dissolution du combustible et rinçage. Environ 0,2 % de l'inventaire des produits de fission des combustibles se retrouvent dans les déchets de structure, sauf cas particulier comme le couple  $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$  où 0,6 % sont localisés dans les fines de cisailage ou comme le tritium, où entre 60 % et 80 % sont retenus du fait de sa diffusion dans les gaines en zircaloy. La majeure partie des produits de fission est implantée dans les coques par recul dans la zircone. Seul le tritium se retrouve dans le zircaloy.

En ce qui concerne **les actinides des déchets de structure**, entre 0,013 % et 0,03 % de l'inventaire des combustibles sont retenus dans les coques. Le plutonium constitue le principal radionucléide (70 % contenus dans les dépôts salins et 30 % dans la zircone).

Les fines produites par le cisailage des éléments de structure sont également contaminées par la solution de dissolution. Elles contiennent près de 3 % de l'activité  $\alpha$  des coques (alors qu'elles ne représentent que 0,12 % en masse) et 4 à 6 % de l'activité en  $\beta\gamma$  (produits de fission), essentiellement  $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$ . Concernant les déchets technologiques, la localisation des radionucléides correspond à une contamination de surface.

Les actinides, ainsi que  $^{41}\text{Ca}$  et  $^{65}\text{Zn}$  sont situés en surface (dépôts, fines) ;  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  ou  $^{93}\text{Zr}$  sont quasiment uniquement localisés dans les coques (zircaloy et zircone) ;  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{63}\text{Ni}$  ou  $^{94}\text{Nb}$  sont quasiment uniquement localisés dans les autres structures (acier inoxydable et inconel) ; d'autres ( $^{53}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Fe}$ ,  $^{93}\text{Mo}$ ) sont répartis dans les coques et dans les déchets de structure.



Représentation schématique de la localisation des radionucléides dans les différents déchets des colis types B4 et B5

#### 10.2.3.4 Le relâchement des radionucléides par les autres types de déchets

Les radionucléides présents dans les autres matériaux des déchets B (verre, composés organiques,...) sont également situés en surface des déchets (contamination) ou inclus (activation). Ceci peut être illustré sur les exemples suivants :

- les déchets d'activation (colis types B1) en *alliage AIC* (grappes de commande) et les déchets en *carbure de bore* (colis types B1 et B6.5) sont contaminés dans leur masse ;
- les déchets en *verre* sont soit des déchets d'activation (pyrex des grappes poison des colis types B1), soit des déchets nucléaires (verre nucléaire des colis types B6.1, boues vitrifiées des colis types B3.2.2), soit des déchets contaminés en surface (verrerie diverse des colis types B3.1.3, B3.3.3,...) ;
- dans les déchets radifères (colis types B8), les radionucléides (radium principalement) sont associés aux sulfates de plomb

Les durées nécessaires à l'arrivée de l'eau liquide au contact de ces déchets sont semblables à celles évaluées pour les déchets métalliques ci-dessus, c'est-à-dire, quelques milliers d'années à une centaine de milliers d'années en fonction de la nature du colis type. Le taux d'hygrométrie suffisant à l'amorçage de leur corrosion est atteint en quelques centaines à quelques milliers d'années.

De même que pour les déchets métalliques, la durée du relâchement des radionucléides de ces déchets est fortement variable selon qu'ils sont localisés en surface des déchets ou bien dans leur masse. Le relâchement des contaminants surfaciques est rapide dès l'arrivée de l'eau liquide au contact des déchets (indépendamment de leur rétention développée ci-dessous, cf. § 10.3.2). En revanche, en ce qui concerne les radionucléides présents dans la structure des matériaux, leur relâchement est plus lent puisqu'il dépend directement de la dégradation du matériau lui-même. Il se poursuit jusqu'à la dégradation complète des déchets. Cette dernière s'étend sur quelques milliers d'années, voire plusieurs centaines de milliers d'années pour les déchets en verre (Figure 10.2.1).

10- Le relâchement et le transfert des radionucléides

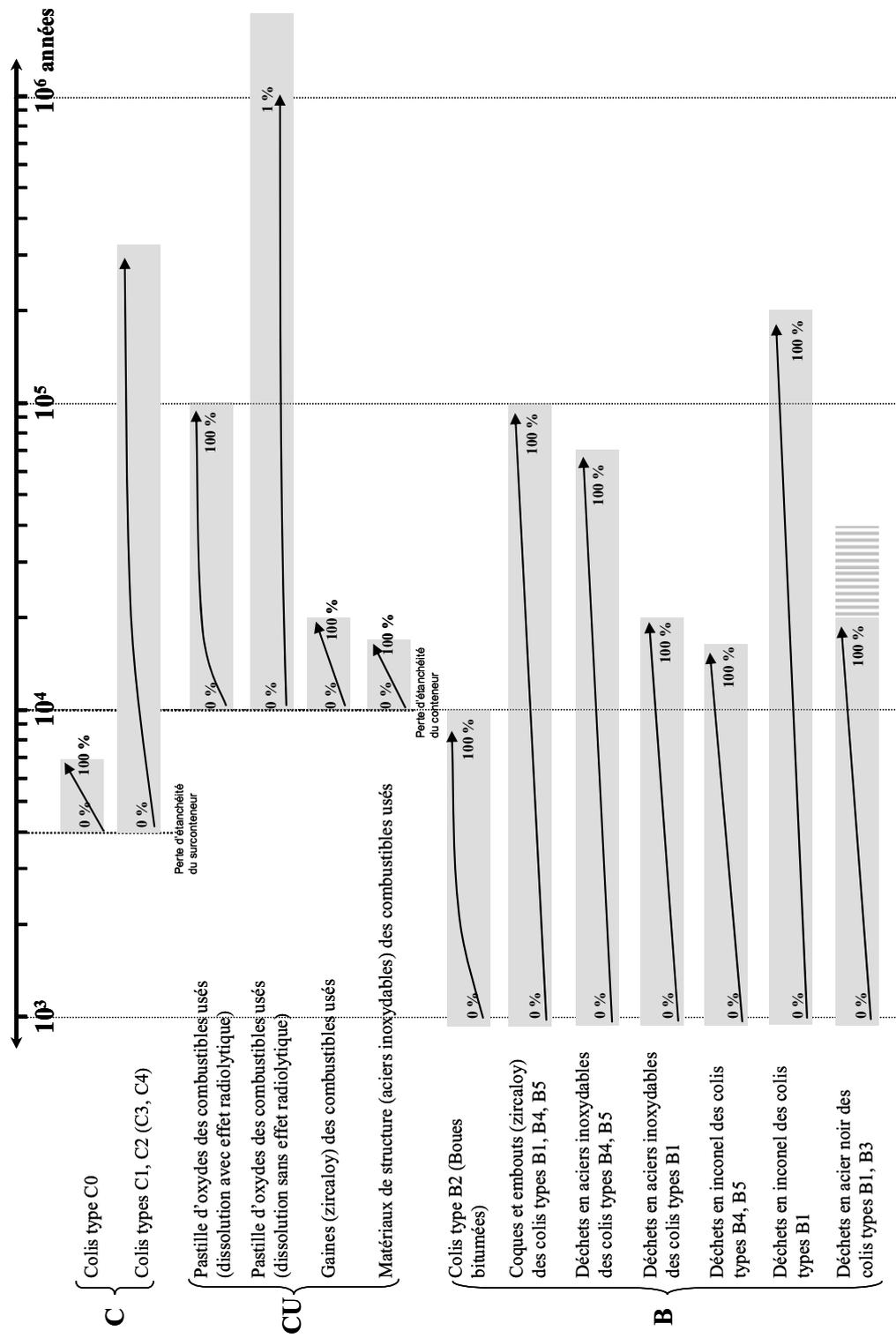


Figure 10.2.1 Chronogramme des processus de dégradation des colis types (sur la base du chronogramme conventionnel séculaire de réalisation / exploitation / fermeture du stockage)

### 10.3 Le transfert des radionucléides dans les ouvrages du stockage

Après relâchement par les déchets, la mobilité des radionucléides dans le stockage dépend de la chimie des eaux, des propriétés de rétention des matériaux ainsi que des conditions d'écoulement dans les alvéoles et dans les galeries (Encadré 10.5, Encadré 10.6 et Encadré 10.7). Ces différents facteurs sont abordés dans les paragraphes qui suivent en fonction du type d'ouvrage considéré. On traite séparément des propriétés de rétention qui, couplées à la chimie en solution, conditionnent l'immobilisation de nombreux radionucléides au sein même des alvéoles. Après avoir défini l'ensemble de ces facteurs, on décrit les voies de transfert des radionucléides depuis les colis de déchets, au sein des alvéoles puis vers les argilites et/ou les galeries. La description du transfert des radionucléides dans le stockage s'appuie sur les éléments fournis dans les chapitres concernant les écoulements et l'évolution chimique du stockage (cf. § 6 et § 7)

On retiendra qu'en marge de transitoires de très courte durée, le transfert des solutés et donc des radionucléides s'effectue par diffusion dominante. L'environnement chimique est marqué par une lente évolution des composants et en particulier des argiles gonflantes et des bétons et par des extensions des perturbations limitées dans l'espace.

#### *Encadré 10.5 Les propriétés de sorption des argiles*

##### **La Capacité d'Echange Cationique (CEC)**

Les argiles ont la capacité de fixer de façon réversible (échangeable) des cations contenus dans les solutions interstitielles ; c'est la capacité d'échange cationique (CEC, en meq.100g<sup>-1</sup>). Ces cations sont retenus par des liaisons faibles soit sur la face externe des cristaux, soit dans les zones interfoliaires (Bouchet *et al.*, 2000).

Les sites de fixation des cations sur les surfaces externes sont des sites de bordure des feuillets ou bien des défauts émergeant des faces. Les propriétés des sites externes dépendent du pH. La CEC interne reflète le déficit de charge des feuillets (remplacement d'un ion Si<sup>4+</sup> par un ion Al<sup>3+</sup> dans la couche tétraédrique de silice, d'un ion Al<sup>3+</sup> par un Mg<sup>2+</sup> dans la couche octaédrique d'aluminium,...) ; elle dépend donc de la charge permanente du matériau argileux.

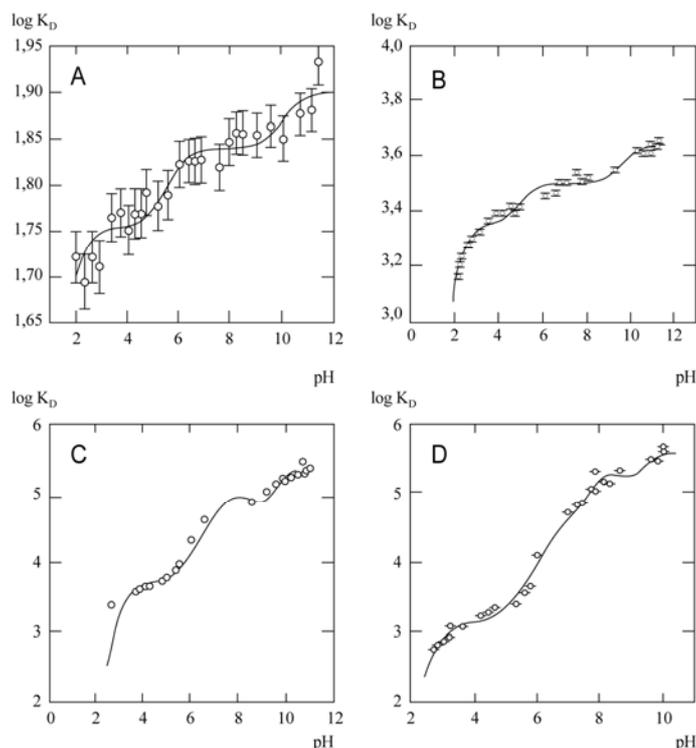
La CEC totale est égale à la somme de la CEC externe (charges variables avec le pH) et de la CEC interne (charges fixes). Les minéraux argileux présentent des valeurs de CEC totale variables en fonction de leur structure (tableau ci-dessous).

*Capacité d'échange cationique (CEC) de quelques minéraux argileux*

<b>Minéraux</b>	<b>CEC (meq.100g<sup>-1</sup>)</b>
Kaolinite	5 – 15
Illite	25 – 40
Montmorillonite	80 – 120
Chlorite	5 – 15

##### **Les propriétés de sorption des argiles**

La CEC ne permet cependant pas d'évaluer directement les propriétés de sorption d'un matériau en raison notamment de l'existence de différents types de sites d'adsorption sur les surfaces argileuses. Ainsi, à l'échelle des traces, les effets capacitifs sont secondaires et le comportement des radionucléides est gouverné par le (ou les) type(s) de sites avec lesquels ils présentent la plus forte affinité chimique. À titre d'illustration, les travaux de (Gorgeon, 1994) montrent des capacités d'adsorption de Cs et de Am similaires pour une smectite du Wyoming et une illite du Puy (cf. Figure ci-dessous). La modélisation proposée rend compte d'une concentration de sites plus faible pour l'illite, compensée par des constantes d'adsorption plus élevées que pour la smectite (Giffaut & Buschaert, 2005).



Comparaison des isothermes de sorption de Cs et Am, respectivement sur une smectite et une illite. A. Fixation de Cs(I) sur une smectite du Wyoming [NaCl] 1M. B. Fixation de Cs(I) sur une illite du Puy [NaCl] 1M. C. Fixation de Am(III) sur une smectite du Wyoming [NaCl] 0,1M. D. Fixation de Am(III) sur une illite du Puy [NaCl] 0,1M

### Encadré 10.6 La description de la rétention et du transport des solutés dans un milieu poreux

L'équation couramment utilisée pour décrire le transport d'un soluté inerte dans un milieu poreux est l'équation de convection-dispersion :

$$\frac{\partial \omega C_e}{\partial t} = -\text{div}(F)$$

Avec :  $\omega$  : porosité (-)

$C_e$  : concentration du soluté dans l'eau ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

$\text{div}(F)$  : divergence des flux convectif et diffusif ( $\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$ )

Lorsque le soluté transporté par l'eau interagit avec la matrice poreuse, la concentration totale de soluté se répartit entre la phase liquide,  $C_e$ , et la phase solide,  $C_s$ , et l'équation de convection-dispersion devient :

$$\frac{\partial \omega C_e}{\partial t} + \rho_d \frac{\partial C_s}{\partial t} = -\text{div}(F)$$

Avec :  $\rho_d$  : masse volumique sèche du milieu poreux ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

$C_s$  : concentration en soluté dans le solide ( $\text{kg.kg}^{-1}$ )

Plusieurs modèles de sorption permettant de relier la concentration en phase liquide et la concentration en phase solide existent. Le modèle  $K_d$  exprime une relation linéaire entre ces deux grandeurs, valable à l'équilibre dans une gamme de concentrations et dans des conditions physico-chimiques données.

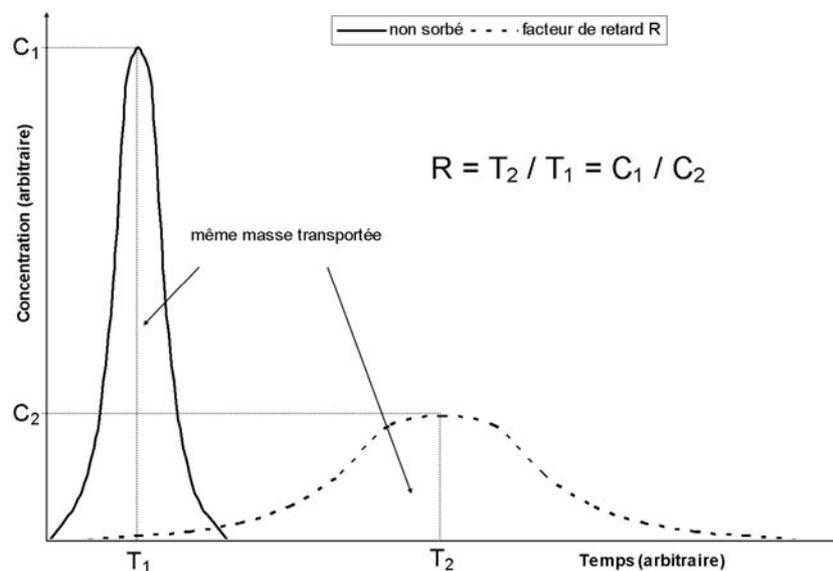
$$C_s = K_d C_e$$

L'équation de convection-dispersion peut se réécrire en faisant apparaître un coefficient (ou facteur) de retard  $R$  de la façon suivante :

$$R \frac{\partial \omega C_e}{\partial t} = -\text{div}(F) \quad \text{avec} \quad R = 1 + \frac{\rho_d K_d}{\omega}$$

Ce facteur de retard exprime que le soluté se déplace moins vite que l'eau. Lorsque le  $K_d$  est nul, le coefficient de retard vaut 1 et l'équation du transport se ramène à celle d'un soluté inerte.

Si la relation linéaire définissant le  $K_d$  est valable aussi bien dans les cas de sorptions que dans les cas de désorptions, le processus est réversible et la totalité de la masse de soluté se retrouve *in fine* en solution après un passage temporaire par la phase solide. Le coefficient de retard,  $R$ , implique alors un transport plus lent qu'en l'absence de sorption. Le facteur de diminution de la vitesse est égal au coefficient de retard, d'où son nom. Le facteur de retard implique alors également une diminution, de ce même facteur, de la concentration maximale en solution par rapport à un soluté non sorbé (voir schéma).



*Schéma montrant pour une même abscisse les différences entre un pic de concentration pour un soluté non sorbé et un soluté sorbé lors d'un transport convectif / dispersif en aval d'un Dirac d'injection de traceur stable et pour une sorption supposée linéaire et totalement réversible*

Dans les alvéoles et dans les argilites du Callovo-Oxfordien, le facteur de retard devient important dès que le  $K_d$  dépasse  $10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . Ainsi, un  $K_d$  de  $10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  correspond à un coefficient de retard de l'ordre de 10.

### 10.3.1 Les conditions physico-chimiques dans les alvéoles du stockage

Les conditions physico-chimiques dans les alvéoles sont marquées par une grande stabilité des matériaux constitutifs (matériaux cimentaires et argileux) et par des conditions redox réductrices. Comme l'a montré le chapitre sur l'évolution chimique des ouvrages du stockage (cf. § 6.4.1), les matériaux composant ces derniers se dégradent lentement (dégradation des bétons, corrosion,...) ou sont peu perturbés chimiquement (stabilité de la barrière ouvragée en argile gonflante,...). Ainsi, les caractéristiques chimiques des alvéoles restent quasi stables dans le temps.

### 10.3.1.1 La chimie des eaux dans les alvéoles de stockage

Dans les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés, les eaux interstitielles sont des eaux argileuses. En particulier, la chimie des eaux de la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés peut être assimilée à celle des argilites. En effet, l'essentiel du fer issu de la corrosion des composants en acier (revêtement, chemisage, (sur)conteneur,...) est mobilisé dans les produits de corrosion et dans les interactions fer / argile. Ainsi, il n'est pas de nature à modifier les propriétés des eaux vis-à-vis des radionucléides, ces dernières gardant une composition proche de l'eau interstitielle des argilites sur le million d'années. Dans le bouchon, la perturbation alcaline est susceptible de provoquer une augmentation du pH ( $12,5 \leq \text{pH} \leq 8$ ) sur quelques décimètres au-delà de plusieurs centaines de milliers d'années. Cette perturbation n'affecte donc pas l'environnement des colis de déchets ou de combustibles usés.

Dans les alvéoles de déchets B, les eaux venant des argilites du Callovo-Oxfordien sont rapidement tamponnées par la dégradation des matériaux cimentaires de l'alvéole (cf. § 7.4). Ainsi, les eaux au contact des colis primaires de déchets B sont des eaux cimentaires saines de pH égal à 12,5. La dégradation chimique des composants en béton de l'alvéole de déchets B étant lente (plusieurs centaines de milliers d'années, cf. § 7.4), la composition des eaux interstitielles à proximité des colis de déchets (pH, éléments majeurs) reste globalement constante tout au long du relâchement des radionucléides. À l'échelle de l'alvéole, la dégradation du béton de structure conduit à la formation d'une zone de béton altéré et dégradé au contact des argilites sur le million d'années. Le pH y est compris entre 10,5 et 12,5.

### 10.3.1.2 Les conditions redox dans les alvéoles de stockage

#### ● Les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés

Bien avant l'arrivée de l'eau liquide au contact des colis de déchets C (4 000 ans en référence) et des colis de combustibles usés (10 000 ans en référence), les conditions redox dans ces alvéoles sont réductrices. Les rayonnements sont arrêtés par les enveloppes métalliques des colis de déchets et ne sont donc pas en mesure de provoquer une radiolyse de l'eau dans l'alvéole. Dans le cas des combustibles usés et au voisinage immédiat des grains d'oxydes, sur quelques dizaines de micromètres (Andra, 2005a, Situation Zu1\_1 ; SKB, 2004), la radiolyse  $\alpha$  de l'eau peut induire des conditions oxydantes (cf. § 7.3.5). Au-delà, les conditions redox sont celles régnant dans l'alvéole et sont réductrices.

Les conditions réductrices dans les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés sont contrôlées par le couple  $\text{Fe}^{\text{II}} / \text{Fe}^{\text{III}}$  et les différentes phases ferrifères présentes (fer métal, produits de corrosion (magnétite, ankérite), pyrite, montmorillonite ferrifère et sidérite dans l'argile gonflante, pyrite et ankérite dans les argilites du Callovo-Oxfordien) (Andra, 2005k). Les assemblages pyrite / magnétite et pyrite / goëthite forment deux tampons réducteurs (environ -300 mV dans les conditions de pH des alvéoles).

Dans le cas des alvéoles de combustibles usés, la dissolution radiolytique des grains d'oxydes conduit au relâchement de l'uranium sous sa valence +VI (cf. § 7.3.5). L'uranium +VI, soluble est réduit au contact des différents composés réducteurs présents dans l'alvéole : fer métallique et produits de corrosion associés des conteneurs et du chemisage, pyrite et sidérite présentes dans l'argile gonflante, pyrite des argilites du Callovo-Oxfordien. La quantité des composés réducteurs et leur réactivité limitent la progression de l'uranium +VI au sein des alvéoles (quelques centimètres au plus). Au-delà de ce front redox, l'uranium est sous sa forme +IV, très peu soluble, et les conditions redox sont celles imposées par les différents composants des alvéoles (cf. ci-dessus) (Andra, 2005k).

Au niveau des argilites, le potentiel redox est imposé par le couple  $S^{II} / S^{IV}$  déterminé par la pyrite et les teneurs en sulfates dans les eaux interstitielles. Cela conduit à des valeurs du potentiel proches de -200 mV (Altmann & Jacquot, 2005). La présence d'hydrogène, surtout à forte concentration à proximité des composants en acier, est susceptible d'imposer localement des conditions encore plus réductrices.

### ● Les alvéoles de déchets B

Le caractère irradiant des colis de déchets B n'est significatif que pour les colis types, B1, B5 et B6 (Andra, 2005a, Situations Zb1x\_1/2, Zb2\_1/2 et Zb1h\_1/2). Les débits de dose ont largement décliné au-delà de 500 ans après la mise en place des colis dans le stockage. Pendant la quasi-totalité de cette période, la resaturation lente des alvéoles de déchets B ne permet pas à l'eau liquide d'atteindre les colis de déchets, limitant ainsi les effets radiolytiques. Les conditions redox deviennent rapidement anoxiques. Elles perdurent sur la durée de relâchement des radionucléides.

Spécifiquement, dans les alvéoles contenant les colis de déchets de types B2 (boues bitumées), le relâchement des nitrates (plusieurs kilogrammes à dizaines de kilogrammes de nitrates par colis, Andra, 2005k) lors de leur dégradation peut conduire à une modification des conditions redox dans l'alvéole. En effet, les nitrates peuvent être réduits par l'activité bactérienne et par la corrosion du fer (Nagra, 2003c ; Pauwels *et al.*, 2000). En fonction de la cinétique de la réduction de ces nitrates, les conséquences sur les conditions redox dans l'alvéole sont variables. Si la réduction est lente (faible réactivité), les nitrates migrent jusqu'au milieu géologique sans interagir avec les composants de l'alvéole et donc sans en modifier significativement les conditions redox telles que décrites précédemment. En revanche, s'ils sont réactifs, leur réduction entraîne la formation d'une zone fortement oxydante à proximité des colis (potentiel redox imposé alors par le couple  $N^V / N^0$ ). Dans ce dernier cas, la cinétique de réduction conduit à une consommation rapide des nitrates. La durée du transitoire oxydant est alors dépendante de la vitesse de relâchement des sels par les colis de déchets et se poursuit sur environ une dizaine de milliers d'années. L'hypothèse d'une forte réactivité reste étroitement corrélée à l'évaluation de l'activité biologique associée. En effet, à l'instar des sulfates, les ions nitrates présentent une forte stabilité moléculaire, qui rend peu probable leur réduction si elle n'est pas catalysée par une activité biologique (Nagra, 1999b). Ces conditions ne pouvant être rencontrées qu'en champ très proche des colis, ce n'est qu'à ce niveau que le transitoire oxydant lié aux nitrates est significatif. Dans le reste de l'alvéole, il n'affecte pas les conditions redox.

Les laitiers utilisés dans les formulations des bétons retenus contiennent de la pyrite qui impose un potentiel redox dans les bétons comparable à celui des argilites. Au contact des colis primaires de déchets, la corrosion des aciers conduit à la formation de magnétite qui forme un couple redox avec les espèces minérales présentes dans les argilites et tamponne le potentiel entre -200 mV et -300 mV (Andra, 2005k ; Nagra, 2003c).

Ainsi, les conditions redox restent très largement réductrices dans les alvéoles de déchets B et sont tamponnées par les espèces ferrifères présentes (Andra, 2005k).

#### 10.3.1.3 Les conditions hydrauliques et de transport des solutés dans les alvéoles de stockage et dans les galeries du stockage

Le chapitre consacré aux écoulements dans et autour du stockage, ainsi qu'au transport des solutés qui leur est associé (cf. § 6) a montré, qu'en dehors de périodes très transitoires, la diffusion est le phénomène dominant pour le transport des solutés dans et autour du stockage.

Du fait de la forme allongée des alvéoles, celles-ci offrent une surface d'échange importante avec les argilites, par rapport à la surface d'échange de la tête d'alvéole avec la galerie d'accès adjacente. Compte tenu de ce rapport de surface et du rapport de perméabilité entre les argilites et le bouchon d'alvéole, la voie de transfert préférentielle des solutés est celle vers les argilites. Seule une très faible

quantité de solutés migre à travers le bouchon d'alvéole (alvéoles de déchets C et alvéoles de combustibles usés) ou le massif de béton (alvéoles de déchets B) vers la galerie d'accès (cf. § 6). Cette dernière présente une grande longueur (jusqu'à plusieurs centaines de mètres pour les modules de déchets C ou les modules de combustibles usés) comparée à son diamètre. La faible composante convective de transport au sein des galeries d'accès et de liaison, du fait de la présence des scellements, conduit à ce que le transport des solutés dans les galeries se fasse préférentiellement par diffusion vers les argilites et non par convection vers les puits.

### **10.3.2 La rétention des radionucléides dans les alvéoles de stockage**

La rétention dans les alvéoles de stockage est principalement pilotée par la nature des phases solides et les caractéristiques chimiques de l'eau interstitielle (Eh, pH, pCO<sub>2</sub> en particulier) (Andra, 2005g).

#### **10.3.2.1 Les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés**

Au sein de ces alvéoles, les produits de corrosion (oxydes, hydroxydes de fer) sont susceptibles de présenter des propriétés de rétention vis-à-vis des radionucléides (SKB, 1996). Le niveau de connaissance disponible ne permet néanmoins pas de quantifier les capacités de rétention de ces phases pour les différents radionucléides pouvant interagir avec elles.

Dans le cas des alvéoles de combustibles usés, la barrière ouvragée en argile gonflante présente des propriétés de rétention élevées pour la majorité des radionucléides en dehors du chlore, de l'iode et du carbone (Encadré 10.6). La partie de la barrière ouvragée argileuse fortement reminéralisée par la perturbation fer / argile (d'une extension pluricentimétrique) contient des zéolithes et des chlorites qui peuvent présenter des propriétés de rétention significatives, comme par exemple pour le césium par les zéolithes (cf. § 7.3.2.2). Au-delà de la zone fortement reminéralisée, les propriétés de rétention de l'argile ne sont pas affectées. Ainsi, on peut considérer que les propriétés de rétention de la barrière ouvragée en grand sont conservées (Giffaut & Coelho, 2005).

### **Encadré 10.7 La solubilité et la sorption des radionucléides dans les argiles gonflantes (1/2)**

Les solubilités des radionucléides dans une argile gonflante sont très comparables à celles exposées pour les argilites du Callovo-Oxfordien (Encadré 10.11). Elles sont largement abordées dans la littérature internationale. Elles ont fait et font l'objet de nombreux programmes de recherche européens (TRANCOM II, RADWASTOM 3C, NFS-2,...) et nationaux (GdR Practis,...). Les données de solubilité retenues par l'Andra proviennent de ces nombreux programmes, ainsi que des recherches spécifiques de l'Andra au travers de groupements de laboratoires. Schématiquement, on peut différencier (Giffaut & Coelho, 2005) :

#### **Les éléments dits « mobiles », comme Cl, I, C et B, présentant une solubilité élevée et une rétention faible**

Le *chlore* et l'*iode* ont une solubilité infinie et pas (ou très peu) de rétention sur les argiles. Le *carbone* présente une solubilité non nulle mais aucune propriété de sorption sur les argiles. Le *bore* est généralement considéré comme un élément mobile (solubilité infinie et faible rétention, entre 2 et  $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

#### **Les autres éléments, présentant une (très) faible solubilité et/ou une forte rétention sur les surfaces argileuses**

- Le *césium* ( $\text{Cs}^+$ ) possède une solubilité infinie en milieu argileux mais il s'adsorbe sur les surfaces argileuses au niveau de deux sites de surface : un site d'échange d'ions et un site silanol. Un modèle permet d'évaluer une constante de partage dans ces conditions ( $\sim 0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ).
- Le *sélénium* possède une très faible solubilité, de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-10} - 10^{-14} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , du fait de son aptitude à co-précipiter avec la pyrite (Encadré 10.11). Dans ces conditions fortement réductrices, il est probable que le sélénium se trouve sous son degré d'oxydation -II. Sa sorption sur les argiles sous cette forme est faible, de l'ordre de  $10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ .
- Le comportement en solution des *lanthanides trivalents* (samarium, europium, holmium et terbium) est globalement semblable pour tous ces éléments. Leur solubilité, pilotée par les processus de co-précipitation, est très faible ( $\sim 10^{-12} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) (Encadré 10.11). Les études de sorption sur l'argile de ces éléments, et en particulier de l'europium, permettent de développer un modèle de sorption. Une valeur moyenne sur le domaine d'intérêt de la constante d'échange est ainsi évaluée ( $\sim 12 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ).
- La solubilité du *plutonium* est d'environ  $2 \cdot 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  dans les conditions fortement réductrices des alvéoles de combustibles usés (Encadré 10.11) ; elle diminue jusqu'à environ  $4 \cdot 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  si les conditions deviennent moins réductrices ( $E_h > -200 \text{ mV}$ ) ou plus basiques ( $\text{pH} > 7,5$ ). Les études expérimentales indiquent une rétention du plutonium IV d'environ  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . Aucune donnée n'est disponible pour le plutonium III, mais sa sorption est probablement semblable à celle des actinides trivalents comme l'américium.
- La solubilité de l'*uranium* IV est de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (Encadré 10.11). Un modèle de complexation de surface a été développé permettant de reproduire la forte rétention observée, de l'ordre de  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ .
- L'*américium* est stable sous sa valence +III dans les conditions d'une alvéole de combustibles usés avec une solubilité proche de  $10^{-10} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (Encadré 10.11). La sorption de l'américium sur les argiles est considérée comme analogue à celle de l'europium ( $\sim 12 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

**La solubilité et la sorption des radionucléides dans les argiles gonflantes (2/2)**

*Synthèse de la solubilité et de la rétention de certains radionucléides d'intérêt dans la barrière ouvragée en argile gonflante des alvéoles de combustibles usés*

Élément	Solubilité (mol.L <sup>-1</sup> )	Kd (m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> )
Cl <sup>I</sup>	infinie	0
B <sup>III</sup>	infinie	~ 10 <sup>-3</sup>
I <sup>I</sup>	infinie	0
Cs <sup>I</sup>	infinie	~ 10 <sup>-1</sup>
Tc <sup>IV</sup>	~ 4·10 <sup>-9</sup>	~ 30
C <sup>IV</sup>	~ 5·10 <sup>-5</sup>	0
Ni <sup>II</sup>	10 <sup>-5</sup> - 10 <sup>-6</sup>	~ 5·10 <sup>-1</sup>
Se <sup>II</sup>	5·10 <sup>-10</sup> - 10 <sup>-14</sup>	~ 10 <sup>-3</sup>
Zr <sup>IV</sup>	10 <sup>-11</sup> - 3·10 <sup>-6</sup>	> 100
Nb <sup>V</sup>	< 5·10 <sup>-7</sup>	~ 10
U <sup>IV</sup>	~ 5·10 <sup>-8</sup>	~ 100
Sm <sup>III</sup>	~ 10 <sup>-12</sup>	~ 12
Eu <sup>III</sup>	~ 10 <sup>-12</sup>	~ 12
Tb <sup>III</sup>	~ 10 <sup>-12</sup>	~ 12
Ho <sup>III</sup>	~ 10 <sup>-12</sup>	~ 12
Th <sup>IV</sup>	~ 10 <sup>-9</sup>	~ 3
Np <sup>IV</sup>	~ 4·10 <sup>-9</sup>	~ 1
Pu <sup>IV</sup> / Pu <sup>III</sup>	2·10 <sup>-7</sup> - 4·10 <sup>-9</sup>	~ 1
Am <sup>III</sup>	~ 10 <sup>-10</sup>	~ 12

**10.3.2.2 Les alvéoles de déchets B**

En conditions anoxiques, les bétons présentent des propriétés de rétention importantes pour la majorité des radionucléides (Encadré 10.9). Néanmoins, comme pour les argiles, on peut identifier des éléments dits mobiles, comme l'iode, le chlore et le technétium (en fonction de sa valence). Les propriétés de rétention des bétons varient avec leur état de dégradation, mais elles restent généralement du même ordre de grandeur pour l'essentiel des radionucléides, en particulier entre l'état sain et l'état altéré.

Le chapitre sur les processus chimiques (cf. § 6.4.1) a montré qu'une alvéole de déchets B se dégradait à sa périphérie au contact des argilites, et ce, sur une échelle de temps de plusieurs centaines de milliers d'années. Sur cette période, on peut considérer schématiquement que seuls coexistent au sein des alvéoles un béton sain au coeur des alvéoles (au niveau des colis de stockage) et un béton altéré en périphérie des alvéoles. Globalement, les propriétés de rétention en grand des alvéoles de stockage de déchets B évoluent donc peu à l'échelle de temps de plusieurs centaines de milliers d'années. Par ailleurs, cette échelle de temps est similaire ou supérieure à celle du relâchement des radionucléides par les différents déchets B.

Les propriétés de rétention (et de solubilité) des alvéoles de déchets B sont susceptibles d'être influencées par la présence de complexants, issus notamment de la dégradation des déchets organiques. Les adjuvants organiques des bétons (fluidifiants ou plastifiants) sont considérés comme n'influençant pas le comportement en solution et la rétention des radionucléides de par leurs faibles concentrations en solution (Giffaut, 2005 ; Nagra, 2002a). De même, l'impact des composés organiques provenant de l'oxydation du kérogène des argilites en parois des alvéoles lors de la

ventilation pendant l'exploitation est jugé faible du fait des faibles teneurs en kérogène dans les argilites.

Les dispositions de conception quant à la répartition des colis de déchets B dans les alvéoles de stockage visent à ne pas mélanger les déchets contenant des composés organiques avec ceux qui n'en contiennent pas. C'est ainsi que les colis de boues bitumées (colis types B2) ou les déchets technologiques des colis types B3 contenant des composés organiques (par exemple les colis types B3.12 ou B3.3.1) sont disposés dans des alvéoles spécifiques. Leurs produits de dégradation ne peuvent donc pas influencer les propriétés de rétention des alvéoles de déchets B contenant des colis types B5 ou B4 par exemple.

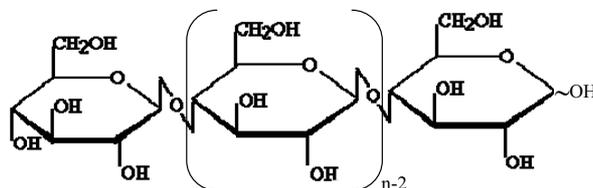
Les complexants organiques produits par les déchets proviennent principalement de produits de décontamination utilisés dans les processus de retraitement, de la dégradation des colis de boues bitumées et de la dégradation de la cellulose (Encadré 10.8) (Andra, 2005g ; Giffaut, 2005).

- Les colis de boues bitumées (colis types B2) relâchent essentiellement des acides carboxyliques (acides formique et acétique) (Bourbon, 2005 ; Giffaut, 2005) La nature des espèces organiques relâchées est influencée par l'oxydation du bitume pendant le transitoire oxydant. Elles sont plus oxygénées, plus polaires et hydrophiles (phénols, diols, cétones, acides) (Encadré 7.14). Parmi elles, les ions oxalates sont les principaux complexants potentiels (Giffaut, 2005) (Encadré 10.8). Différentes études montrent que ces ions oxalates n'influencent pas le comportement des radionucléides. Enfin, les colis de boues bitumées contiennent également du tributyl phosphate (TBP), mais il est sans effet notable sur la rétention des radionucléides, notamment le plutonium dans les conditions des alvéoles (Encadré 10.8). Ainsi, les colis types B2 ne libèrent pas de façon importante des complexants organiques susceptibles de modifier la rétention des radionucléides.
- Les colis types B3 et B5.1 regroupent un inventaire en composés organiques très variable en nature et en quantité (Giffaut, 2005). Cependant, la cellulose est le seul composé pouvant entraîner une forte capacité complexante en conditions hyperalcalines au travers de l'un de ses produits de dégradation, l'acide iso-saccharinique (ISA) (Encadré 10.8). Les bétons présentent des propriétés de rétention vis-à-vis de l'ISA, qui limitent sa concentration en solution. Indépendamment de cette considération, les évaluations des teneurs en solution de l'ISA dans les alvéoles de déchets B (Giffaut, 2005 ; Nagra, 2002a) montrent des concentrations suffisamment faibles pour ne pas influencer le comportement des radionucléides en solution et leur rétention.

Par conséquent, de manière générale, la rétention des radionucléides n'est pas influencée par les différents composés organiques susceptibles d'être présents dans les alvéoles de déchets B.

**Encadré 10.8 Les complexants organiques contenus dans les déchets B ou issus de la dégradation des déchets B organiques**

Les déchets B recouvrent un inventaire assez large en composés organiques, en particulier de la cellulose. La dégradation de ces derniers conduit par la suite à la formation d'autres composés organiques (Giffaut, 2005).



*Formule de la cellulose*

Parmi ces produits organiques initiaux ou leurs produits de dégradation, seuls quelques composés organiques sont susceptibles d'avoir des propriétés complexantes : les oxalates, le tributyl phosphate (TBP), ou l'acide iso-saccharinique (ISA).

**Les oxalates**

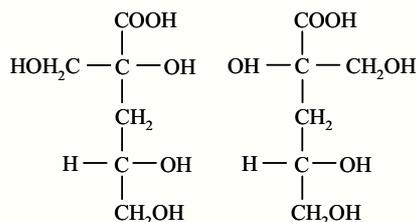
Les complexes formés par les oxalates sont généralement faibles et dans les conditions des alvéoles de déchets B, leur concentration est limitée par la solubilité des oxalates de calcium.

**Le tributyl phosphate (TBP)**

Le tributyl phosphate ( $C_{12}H_{27}O_4P$ ) est présent dans les colis de boues bitumées. La concentration de ce complexant puissant du plutonium est néanmoins limitée par sa solubilité en milieu cimentaire. Ses produits de dégradation (monobutyl phosphate  $C_4H_{11}O_4P$  et dibutyl phosphate  $C_8H_{19}O_4P$ ) ne présentent pas de propriétés complexantes significatives envers les radionucléides en milieu cimentaire.

**L'acide iso-saccharinique (ISA)**

L'acide iso-saccharinique (ISA) est issu de la dégradation de la cellulose ( $(C_6H_{12}O_6)_n$ , n compris entre 200 et 3 000 (cf. figure ci-dessus). Il est formé d'un mélange de deux isomères :  $\alpha$ -iso-saccharinique et  $\beta$ -iso-saccharinique (cf. figure ci-dessous) (Glaus & Van Loon, 2004).



*Formule des acides  $\alpha$ -iso-saccharinique (à gauche) et  $\beta$ -iso-saccharinique (à droite)*

La capacité complexante des acides iso-sacchariniques est liée à leur concentration en solution. Cette dernière est elle-même liée à la cinétique de dégradation de la cellulose. Cette cinétique est considérée comme très lente en milieu cimentaire (environ 10 % dégradés en 100 000 ans, la totalité en 1 000 000 ans). Par ailleurs, la sorption de l'ISA sur les phases cimentaires limite sa teneur en solution (Giffaut, 2005 ; Glaus & Van Loon, 2004).

Dans les conditions des alvéoles de déchets B, la concentration de l'ISA dans les eaux interstitielles est estimée de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$  (Giffaut, 2005). À ces concentrations, les constantes de répartition des radionucléides ne sont pas significativement modifiées (Baston *et al.*, 1994)

**Encadré 10.9 La solubilité et la sorption des radionucléides dans les matériaux cimentaires (1/2)**

La solubilité des radionucléides est évaluée à partir de calculs d'équilibre (avec la base de données thermodynamiques Andra : Thermochimie v.5) comparés à des données de la littérature et/ou de mesures directes dédiées. La sorption est appréciée à partir de mesures sur échantillons en batch ou sur colonne, et de la littérature (Andra, 2005g ; Giffaut, 2005). Schématiquement, on peut différencier (Giffaut, 2005) :

**Les éléments dits « mobiles » en milieu cimentaire, comme Cl, I et Tc**

- Le *chlore*, l'*iode* et, dans certaines conditions, le *technétium* sont des éléments qui ont une solubilité infinie, mais ces deux derniers présentent des propriétés de sorption non nulles sur les phases cimentaires.
- La fixation de l'*iode* par les phases cimentaires est faible (substitution des sulfates des mono-sulfo-aluminates, affinité pour les CSH,...) :  $K_d \sim 10^{-3} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$  (Giffaut, 2005 ; Nagra, 1999a).
- Le comportement du *technétium* dépend des conditions redox. En effet, deux états d'oxydation peuvent coexister :  $\text{Tc}^{\text{IV}}$  et  $\text{Tc}^{\text{VII}}$ .  $\text{Tc}^{\text{VII}}$  présente une solubilité infinie et une rétention quasi nulle. Aux pH fortement basiques imposés par les premières étapes de la dégradation des bétons (béton sain et béton altéré), les conditions réductrices des matériaux cimentaires considérés seuls ( $\sim -310 \text{ mV}$ ) sont à la limite du domaine de stabilité entre les deux états d'oxydation du technétium ( $-350 \text{ mV}$  à  $\text{pH} = 12$ ). Au sein des alvéoles, du fait des fortes quantités de déchets en acier et de la formation d'hydrogène lors de leur corrosion en conditions réductrices, il est probable que les conditions soient bien plus anoxiques. Dès lors, la solubilité du technétium est limitée par la précipitation de  $\text{TcO}_2.n\text{H}_2\text{O}$  ( $\sim 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}$ ). La sorption du  $\text{Tc}^{\text{IV}}$  est moyenne sur les matériaux cimentaires ( $\sim 2 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ ).

**Les autres éléments présentant une faible à très faible solubilité et/ou une (forte) sorption sur les phases cimentaires.**

- Le *césium* a une solubilité infinie dans les milieux cimentaires, mais il présente une affinité non négligeable pour les phases CSH des matériaux cimentaires avec un  $K_d$  de l'ordre de  $10^{-2} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ .
- Le *sélénium* est stable sous son degré d'oxydation +IV dans les conditions des alvéoles de déchets B. L'ion  $\text{SeO}_3^{2-}$ , malgré sa charge négative, présente une certaine affinité pour les surfaces des CSH ( $K_d$  de l'ordre de  $0,1 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ ). De plus, la portlandite présente une forte capacité à fixer  $\text{Se}^{\text{+IV}}$  du fait probablement de la stabilité du solide  $\text{CaSeO}_3$  ( $\sim 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$ ) et d'une tendance à former une solution solide avec l'ettringite.
- L'*uranium* est un élément sensible aux conditions redox. Son comportement varie fortement entre son état d'oxydation +IV et +VI. Les conditions alcalines des alvéoles de déchets B semblent stabiliser l'état d'oxydation +VI. Mais la détermination de la phase solide contrôlant la solubilité de l'uranium dans ces conditions est complexe, entre l'uraninite ( $\text{UO}_2.x\text{H}_2\text{O}$ ) et la schœpélite ( $\text{UO}_2(\text{OH})_2.H_2\text{O}$ ), en passant par la formation de phases calciques telle que l'uranophane ( $\text{Ca}[(\text{UO}_2)(\text{SiO}_3\text{OH})]_2.5\text{H}_2\text{O}$ ) en fonction des conditions redox. Dans le milieu cimentaire des alvéoles, les phases calco-silicatées sont probablement favorisées. La solubilité de l'uranium est alors de l'ordre de  $10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$ . En ce qui concerne les processus de sorption, ils sont importants sur les phases cimentaires ( $\sim 50 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ ).

**La solubilité et la sorption des radionucléides dans les matériaux cimentaires (2/2)**

- La solubilité des *lanthanides trivalents* (Sm, Eu, Tb, Ho) en milieu cimentaire est pilotée par les processus d'incorporation et de co-précipitation avec des solides calciques (phosphates de calcium, calcite, portlandite,...), ce qui conduit à une solubilité très faible ( $\sim 10^{-10}$  mol.L<sup>-1</sup>). Concernant leur capacité de sorption, ces éléments ont une grande affinité pour les phases cimentaires, en particulier les CSH ( $\sim 100$  m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>). Des processus de sorption irréversibles sont également envisageables, limitant d'autant plus la mobilité de ces éléments.
- Le *thorium* présente une très faible mobilité dans les conditions des alvéoles de déchets B. Sa solubilité est en effet très faible ( $\sim 10^{-11}$  -  $\sim 10^{-10}$  mol.L<sup>-1</sup>) et son affinité pour les phases minérales présentes très forte ( $\sim 20$  m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>).
- Le *neptunium* et le *plutonium* sont stabilisés en milieu cimentaire réducteur sous le degré d'oxydation +IV. Leurs solubilités sont pilotées par les phases NpO<sub>2</sub>.xH<sub>2</sub>O et PuO<sub>2</sub>.xH<sub>2</sub>O conduisant à des teneurs faibles (respectivement  $\sim 5 \cdot 10^{-9}$  mol.L<sup>-1</sup> et  $\sim 10^{-9}$  mol.L<sup>-1</sup>). La sorption du neptunium n'a pas été étudiée sur des phases cimentaires. Par analogie de comportement, il est possible toutefois de l'assimiler au plutonium. Ils présentent ainsi une importante rétention sur les phases cimentaires, de l'ordre de  $\sim 20$  m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>.
- L'*américium* est stable sous sa valence +III et présente un comportement similaire aux lanthanides et en particulier à l'euporium qui est un analogue. Sa solubilité est ainsi de l'ordre de  $\sim 10^{-10}$  mol.L<sup>-1</sup>. En revanche, sa sorption sur les phases cimentaires apparaît plus faible que pour l'euporium ( $\sim 30$  m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>).

*Synthèse de la solubilité et de la rétention de certains radionucléides d'intérêt dans un milieu cimentaire sain à altéré*

Élément	Solubilité (mol.L <sup>-1</sup> )	Kd (m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> )
Cl <sup>I</sup>	infinie	0
I <sup>I</sup>	infinie	$\sim 10^{-3}$
Cs <sup>I</sup>	infinie	$\sim 10^{-2}$
Tc <sup>IV</sup> / Tc <sup>VII</sup>	$\sim 10^{-7}$ / infinie	$\sim 2 / 0$
C <sup>IV</sup>	$\sim 10^{-5}$ - $\sim 10^{-6}$	$\sim 1$
Ni <sup>II</sup>	$\sim 2 \cdot 10^{-7}$	$\sim 2$
Se <sup>-IV</sup>	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-1}$
Zr <sup>IV</sup>	$\sim 10^{-8}$	$\sim 40$
Nb <sup>V</sup>	$\sim 10^{-9}$	$\sim 100$
U <sup>VI</sup>	$\sim 10^{-6}$	$\sim 50$
Sm <sup>III</sup>	$\sim 10^{-10}$	$\sim 100$
Eu <sup>III</sup>	$\sim 10^{-10}$	$\sim 100$
Tb <sup>III</sup>	$\sim 10^{-10}$	$\sim 100$
Ho <sup>III</sup>	$\sim 10^{-10}$	$\sim 100$
Th <sup>IV</sup>	$\sim 10^{-11}$ - $\sim 10^{-10}$	$\sim 20$
Np <sup>IV</sup>	$\sim 5 \cdot 10^{-9}$	$\sim 20$
Pu <sup>IV</sup>	$\sim 10^{-9}$	$\sim 20$
Am <sup>III</sup>	$\sim 10^{-10}$	$\sim 30$

### 10.3.3 Le transfert des radionucléides dans le stockage : les voies de transfert et les temps caractéristiques

#### 10.3.3.1 Les radionucléides en solution

On rappelle que, de manière générale, la voie de transfert principale des solutés dans les alvéoles de stockage est la voie radiale en direction des argilites. La voie de transfert des solutés par le bouchon des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés ou par le scellement des alvéoles de déchets B est une voie secondaire. De même, dans les galeries d'accès et de liaison, la voie de transfert longitudinale est secondaire et l'essentiel du transfert s'effectue par dispersion / diffusion vers les argilites (cf. § 6). La convection ne devient dominante que lorsque l'on se rapproche des puits. En effet, les ramifications du réseau de galeries impliquent des surfaces de drainage amont de plus en plus importantes au fur et à mesure que l'on s'éloigne des alvéoles pour se rapprocher des puits. Il en découle une augmentation des vitesses de d'écoulement de l'eau à l'approche des puits, de l'ordre de  $10^{-5} \text{ m.an}^{-1}$  à  $10^{-4} \text{ m.an}^{-1}$ . Ces vitesses sont néanmoins très faibles, et correspondent à des temps de transfert par convection de l'ordre de plusieurs milliers à dizaines de milliers d'années par mètre.

#### ● La zone de stockage de déchets C et les zones de stockage de combustibles usés

Les relâchements des radionucléides par les colis de déchets C et les colis de combustibles usés débutent respectivement au plus tôt vers 4 000 ans et 10 000 ans. À ces dates, les charges thermiques dans les alvéoles de stockage ont déjà largement décliné : la température est quasi homogène et inférieure à 50 °C. La dissolution du verre pour les déchets C, la corrosion des composants métalliques et la dissolution des matrices d'oxydes pour les combustibles usés débutent.

La dissolution des verres se poursuit sur plusieurs centaines de milliers d'années et correspond à un lent relâchement en solution des radionucléides. Pour l'essentiel de ceux-ci, notamment les actinides, leur concentration dans l'eau est contrôlée par leur solubilité au sein même des colis ou à leur contact. À cela s'ajoute (i) la rétention de nombreux radionucléides sur les produits d'altération du verre (pellicule d'altération et phyllosilicates secondaires) et (ii) la co-précipitation de radionucléides. Les produits de corrosion présentent vraisemblablement des propriétés de rétention, mais elles ne sont pas quantifiées à ce jour. Une faible fraction de ces radionucléides relâchés, celle définie par les limites de solubilité, migre en solution hors des alvéoles. L' $^{129}\text{I}$  et le  $^{36}\text{Cl}$ , qui ne sont pas contrôlés en solution et dont la sorption est nulle, migrent immédiatement hors des alvéoles dans les argilites. Ce processus se poursuit tout au long de la dissolution du verre. La quantité de radionucléides qui migre hors des alvéoles est alors contrôlée principalement par les limites de solubilité des radionucléides et leur diffusion dans les argilites vers les encaissements sus-jacent et sous-jacent.

Un processus globalement similaire affecte les alvéoles de combustibles usés. Il s'en différencie par la présence de la barrière ouvragée et par les caractéristiques propres du relâchement des radionucléides par les assemblages de combustibles usés. Une fraction de l'inventaire en radionucléides est immédiatement disponible à la mise en solution dès l'arrivée d'eau (*i.e.* la fraction labile). C'est en particulier le cas des radionucléides mobiles comme  $^{129}\text{I}$  et  $^{36}\text{Cl}$ . Leur fraction labile migre alors à travers la barrière ouvragée vers les argilites. Le maximum de débit molaire de  $^{129}\text{I}$  en sortie de la barrière ouvragée est atteint en 200 ans environ. Pour la majorité des autres radionucléides, les maxima des débits molaires en sortie de la barrière ouvragée sont atteints en quelques milliers d'années (cas du  $^{59}\text{Ni}$  par exemple), quelques dizaines de milliers d'années (cas du  $^{99}\text{Tc}$  par exemple) ou quelques centaines de milliers d'années (cas de l'uranium par exemple), suivant notamment leurs comportements propres (Encadré 10.6).

On notera que durant les quelques milliers à dizaines de milliers d'années qui suivent la perte d'étanchéité des conteneurs jusqu'au retour aux températures géothermales, les températures dans la barrière ouvragée et/ou dans les argilites en champ proche des alvéoles n'entraînent qu'une légère augmentation des propriétés de rétention et du coefficient de diffusion (Giffaut & Coelho, 2005), et n'ont donc qu'un effet secondaire sur la migration des radionucléides. Les données actuelles indiquent une faible augmentation de la rétention (inférieure à un ordre de grandeur) pour les espèces cationiques sensibles aux processus de sorption de surface (nickel, europium,...), tandis que, pour les cations sensibles à l'échange d'ions (césium,...), aucun effet de la température n'est visible.

Parmi les radionucléides qui sont peu ou ne sont pas retenus comme  $^{129}\text{I}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  et  $^{14}\text{C}$ , la majeure partie (> 90 %) migre hors des alvéoles vers les argilites du Callovo-Oxfordien. Une faible proportion migre vers les galeries (< 10 %, cf. § 10.4), sans être affectée par la perturbation alcaline qui se développe dans le bouchon argileux de l'alvéole et la dégradation du massif d'appui en béton. Ces dernières entraînent une modification progressive de la solubilité et de la rétention des radionucléides en partie externe du bouchon argileux et dans le bouchon en béton. Ces processus chimiques interviennent au-delà de plusieurs centaines de milliers d'années, et ils ne modifient donc pas le schéma général de migration. Ainsi, la zone de bouchon argileux peu perturbée garde ses propriétés initiales de rétention (Giffaut & Coelho, 2005) et les propriétés de rétention de la zone fortement reminéralisée se rapprochent de celles d'un béton dégradé.

#### ● La zone de stockage de déchets B

Le schéma général du transfert des radionucléides dans les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés s'applique aux alvéoles de déchets B. Il s'en différencie principalement par la nature des matériaux (béton *versus* argile gonflante ou argilites) et l'existence d'un état non saturé des alvéoles de déchets B. Celui-ci n'empêche pas globalement la dégradation des déchets et le relâchement des radionucléides, mais il ralentit la migration des radionucléides relâchés dans les alvéoles. Au-delà de la centaine de milliers d'années, les conditions de saturation sont proches de la saturation totale et cet effet disparaît. La migration des radionucléides relâchés s'effectue préférentiellement par la voie radiale vers les argilites. La solubilité et la sorption des radionucléides dans les bétons diffèrent de celles dans les argiles gonflantes et les argilites. Toutefois, on retrouve le caractère mobile d'éléments comme l'iode et le chlore, bien que les bétons présentent des propriétés de rétention, faibles mais non négligeables, vis-à-vis de l'iode. Ce sont donc ces éléments mobiles qui migrent principalement hors des alvéoles. Les maxima de débit molaire des autres radionucléides en paroi des alvéoles sont atteints en plusieurs milliers à plusieurs centaines de milliers d'années.

#### ● Les puits

Au sein du stockage, seule une très faible partie des radionucléides les plus mobiles, comme l'iode et le chlore, migre à travers le système de galeries jusqu'aux puits (cf. § 6.3.3). La proportion sortant des puits sur un million d'années est faible. Par exemple, pour l' $^{129}\text{I}$  des combustibles usés CU1, la fraction de l'inventaire total sortant par les puits est de l'ordre de  $3 \cdot 10^{-5}$  % (Pépin & Vialay, 2004).

#### 10.3.3.2 Les radionucléides gazeux

Parmi les radionucléides, seul le  $^{14}\text{C}$  peut s'exprimer sous forme gazeuse dans les conditions physico-chimiques du stockage (Encadré 10.10). Cela ne concernerait que les colis types B5.1. Pour ces colis, la fraction gazeuse du  $^{14}\text{C}$  relâché peut migrer pendant la phase d'état non totalement saturé des alvéoles de déchets B et des galeries de liaison, suivant la voie verticale dans les argilites et suivant la voie horizontale dans les galeries d'accès. Toutefois, cela ne concernerait que les premiers milliers d'années correspondant à la période de propagation de l'hydrogène dans le Callovo-Oxfordien et dans les galeries du stockage jusqu'aux puits. Au-delà de 10 000 ans, à l'échelle du stockage, la production d'hydrogène diminue, ce qui permet l'atteinte progressive d'un état totalement saturé du stockage. Au

droit de la zone de stockage de déchets B, la migration de l'hydrogène dans le Callovo-Oxfordien n'excéderait pas les 2/3 des gardes haute et basse (vers l'Oxfordien carbonaté et vers le Dogger), bloquant ainsi la migration du  $^{14}\text{C}$  gazeux. Celle-ci ne peut s'effectuer alors que par dissolution et diffusion dans les eaux des argilites vers les encaissants. L'hydrogène présent dans les galeries jusqu'aux puits pourrait conduire à l'existence d'une voie de transfert des gaz jusqu'à l'Oxfordien carbonaté au niveau des puits, permettant ainsi la migration de  $^{14}\text{C}$  directement dans l'Oxfordien carbonaté. Cette voie de transfert est peu probable. Par ailleurs, elle ne durerait pas au delà de 10 000 ans. De manière générale, au-delà de cette période, le  $^{14}\text{C}$  relâché par les colis B5.1 migrerait progressivement de manière préférentielle par dissolution et diffusion dans les eaux des alvéoles de stockage et des argilites.

#### *Encadré 10.10 Les radionucléides gazeux dans les conditions du stockage*

Parmi les radionucléides des déchets HAVL et des combustibles usés, seuls quelques-uns sont susceptibles de se trouver sous forme gazeuse dans les conditions du stockage :  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{39}\text{Ar}$  et  $^{85}\text{Kr}$ . Le  $^{36}\text{Cl}$  et l' $^{129}\text{I}$  sont à l'état gazeux (dit encore volatil) en réacteur. Ainsi, en réacteur,  $^{129}\text{I}$  peut se combiner avec le césium pour former CsI, partiellement volatil (Nagra, 2002b). Dans les conditions du stockage, en présence d'eau,  $^{129}\text{I}$  se dissout sous forme d'iodure I<sup>-</sup>, qui n'est pas gazeux. Sa conversion sous une forme volatile ( $\text{CH}_3\text{I}$  ou  $\text{I}_2$ ) apparaît très peu probable puisque ces composés sont très réactifs ou bien s'hydrolysent facilement à nouveau sous forme d'iodures (Nagra, 2003a). De même, dans les conditions du stockage,  $^{36}\text{Cl}$  ne se trouverait que sous une forme non gazeuse (chlorures) (Giffaut, 2005).

$^3\text{H}$ ,  $^{39}\text{Ar}$  et  $^{85}\text{Kr}$  ont des périodes courtes (respectivement 12,3 ans, 269 ans et 10,7 ans). Ils disparaissent rapidement par décroissance radioactive et concernent essentiellement la période d'exploitation du stockage. C'est en particulier le cas du  $^3\text{H}$  qui est relâché continûment par les colis de déchets B (Andra, 2005m).

En ce qui concerne le  $^{14}\text{C}$ , sa forme gazeuse, en l'occurrence principalement du méthane, ne serait observée qu'en présence d'une activité bactérienne et uniquement pour la fraction organique du  $^{14}\text{C}$  ( $\text{C}^{\text{IV}}$  -  $\text{C}^{\text{VI}}$ ). Cela concernerait essentiellement les composants métalliques des combustibles usés (coques et embouts) et les colis B5. On notera qu'une infime fraction du carbone, inférieure à 0,1 % de l'inventaire total, serait présente directement sous forme gazeuse dans les jeux des crayons de combustible usé lors de leur sortie de réacteur. Pour tous les autres déchets,  $^{14}\text{C}$  serait sous une forme inorganique. Leur dégradation, comme par exemple la dissolution du carbure de fer ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), du carbure de zirconium ( $\text{ZrC}$ ) ou des matrices d'oxydes des combustibles usés conduirait à la formation d'espèces organiques ou de carbonates non gazeux et solubles dans les conditions du stockage (acide acétique, acide formique, acétaldéhyde, formaldéhyde, éthanol, méthanol, propanol,...) (Johnson & Schwyn, 2004).

## **10.4 Le transfert des radionucléides en solution dans la couche du Callovo-Oxfordien depuis le stockage vers les formations encaissantes**

### **10.4.1 L'état phénoménologique de la couche du Callovo-Oxfordien dans le temps au regard des temps de relâchement des radionucléides par les colis de déchets**

Les évolutions hydraulique et chimique du stockage et de son milieu géologique environnant ont montré que la couche du Callovo-Oxfordien n'était pas affectée en grand par les perturbations créées par le stockage. Celles-ci restent limitées en champ très proche du stockage (sur quelques mètres au maximum). En outre, ces perturbations ont des durées limitées, par exemple de quelques milliers d'années à la dizaine de milliers d'années pour les surpressions hydrauliques, liées à la charge thermique et à la production d'hydrogène de corrosion au droit des zones de stockage de déchets C et des zones de stockage de combustibles usés. Ou bien, ces perturbations se développent lentement sur plusieurs centaines de milliers d'années, comme la perturbation alcaline au droit de la zone de stockage de déchets B. Plus spécifiquement, l'endommagement mécanique créé initialement autour

des ouvrages du stockage se cicatrise progressivement (en quelques centaines à quelques milliers ou dizaines de milliers d'années suivant les ouvrages). Cette cicatrisation permet un retour vers des propriétés d'écoulement et de transfert des solutés dans les argilites en champ proche du stockage voisines de celles à l'état initial avant la réalisation du stockage. Enfin, à plus grande échelle, l'évolution géodynamique n'affecte pas directement la couche du Callovo-Oxfordien : au-delà de 300 000 à 500 000 ans, les gradients hydrauliques verticaux dans la couche du Callovo-Oxfordien augmentent progressivement du fait des variations de charges hydrauliques dans le Dogger et surtout l'Oxfordien carbonaté. Néanmoins, cette augmentation ne modifie pas le caractère dominant de la diffusion comme mode de transport des solutés.

Les échelles de temps et d'espace évoquées ci-dessus sont à mettre en relation avec les temps caractéristiques du relâchement et du transfert des radionucléides.

Sur le plan chimique :

l'épaisseur pluridécimétrique ou plurimétrique au maximum des argilites perturbées par la perturbation alcaline ou l'interaction fer / argilites est négligeable vis-à-vis des 50 à 60 mètres de garde minimum entre le stockage et le toit et le mur de la couche du Callovo-Oxfordien. En outre, ces perturbations ne conduisent pas nécessairement à une diminution des propriétés de rétention des radionucléides ou d'écoulement et de transport des solutés ;

la charge thermique ne modifie pas les propriétés de rétention des argilites, notamment en champ lointain. Elle n'induit pas de transformations minéralogiques susceptibles de modifier de manière irréversible la perméabilité des argilites et les coefficients de diffusion des solutés (anions et cations).

Sur le plan des écoulements et du transfert des solutés :

la charge thermique et la production d'hydrogène produit par corrosion conduisent à l'existence transitoire d'écoulements divergents à partir du stockage. Toutefois, ils ne concernent que quelques mètres en champ proche du stockage et ont disparu au-delà de 10 000 ans environ. Cela signifie qu'ils n'ont d'effet potentiel sur le transfert des radionucléides que pour les zones de stockage de déchets C (l'étanchéité des surconteneurs est de 4 000 ans *a minima*) et la zone de stockage de déchets B (le relâchement de radionucléides est possible dès la présence d'eau liquide au contact des déchets, soit au-delà de quelques centaines d'années après la fermeture du stockage). Toutefois, le relâchement des radionucléides par les colis de déchets vitrifiés s'étend sur une période de plusieurs centaines de milliers d'années, de sorte qu'une très faible fraction des radionucléides relâchés est affectée par le transitoire hydraulique. Il en va de même globalement pour les déchets B. Pour les combustibles usés, l'étanchéité de 10 000 ans *a minima* des conteneurs conduit à un relâchement des radionucléides en dehors de la période concernée par les perturbations hydrauliques ;

la diffusion reste le mode de transport dominant des solutés, donc des radionucléides, à l'échelle de la couche du Callovo-Oxfordien.

#### 10.4.2 Le transfert dans la couche du Callovo-Oxfordien

Après leur migration hors des alvéoles de stockage, les radionucléides, notamment ceux mobiles et à vie longue ( $^{129}\text{I}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{79}\text{Se}$ ), peuvent migrer progressivement depuis le stockage par diffusion dans la couche du Callovo-Oxfordien à parts égales jusqu'à l'Oxfordien carbonaté et jusqu'au Dogger au prorata du relâchement par les colis de déchets.

Pour les zones de stockage de combustibles usés, la migration des radionucléides mobiles dans la couche du Callovo-Oxfordien est principalement influencée par la fraction labile (entre 5 % et 35 % de l'inventaire total) immédiatement relâchée dès la perte d'étanchéité des conteneurs à 10 000 ans. La fraction progressivement relâchée par les pastilles d'oxydes sur plusieurs dizaines à la centaine de

milliers d'années ne joue que sur la durée totale du relâchement hors de la couche du Callovo-Oxfordien. Le maximum de débit molaire de  $^{129}\text{I}$  au toit et au mur du Callovo-Oxfordien est atteint vers 250 000 ans environ.

Pour les zones de stockage de déchets C et la zone de stockage de déchets B, on retrouve schéma général similaire à celui des combustibles usés, mais avec des débits molaires plus faibles compte tenu des inventaires initiaux plus faibles et d'une activité labile nulle (cas des déchets C) ou faible (cas des déchets B).

Tous les autres radionucléides, en particulier les actinides, présentent de faibles solubilités et/ou de fortes sorptions dans les argilites. Leur migration dans la couche du Callovo-Oxfordien est donc lente. Associée aux faibles relâchements hors des alvéoles de déchets, elle conduit à ce que ces radionucléides ne migrent que sur quelques mètres dans la couche du Callovo-Oxfordien, de part et d'autre du stockage, sur le million d'années.

Par conséquent,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  et  $^{79}\text{Se}$  (radionucléides mobiles et à vie longue), sont susceptibles d'atteindre les encaissants sur le million d'années. Ceci est illustré dans les Figure 10.4.2, Figure 10.4.4 et Figure 10.4.6 sur les exemples de la zone de combustibles usés CU1 et de la zone des C1-C2.

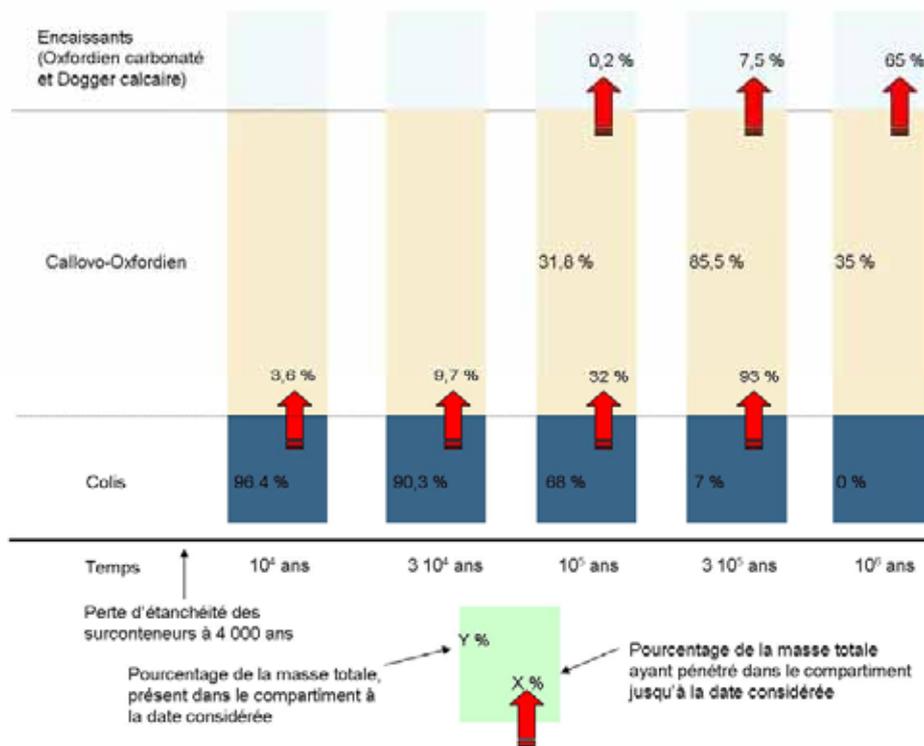


Figure 10.4.1 Répartition de la masse d'iode 129 entre les composants du stockage et la couche du Callovo-Oxfordien, à différents temps, pour la zone de stockage des colis C1-C2. Les pourcentages incluent la masse disparue par décroissance radioactive (réalisé à partir de Andra, 2005m)

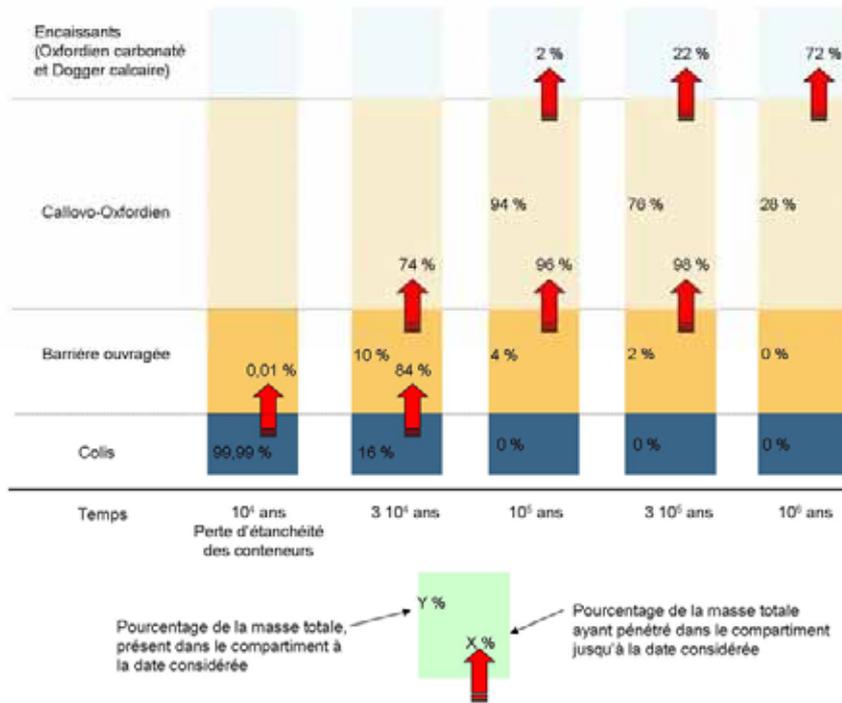


Figure 10.4.2 Répartition de la masse d'iode 129 entre les composants du stockage et la couche du Callovo-Oxfordien, à différents temps, pour la zone de stockage de combustibles usés CU1. Les pourcentages incluent la masse disparue par décroissance radioactive (réalisé à partir de Andra, 2005m)

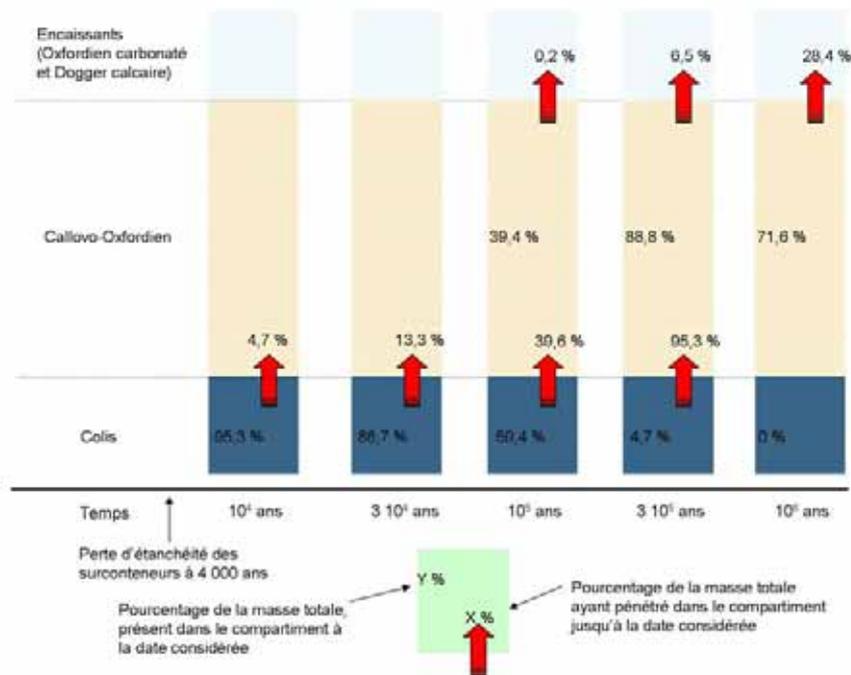


Figure 10.4.3 Répartition de la masse du chlore 36 entre les composants du stockage et la couche du Callovo-Oxfordien à différents temps, pour la zone de stockage des colis C1-C2. Les pourcentages incluent la masse disparue par décroissance radioactive (réalisé à partir de Andra, 2005m)

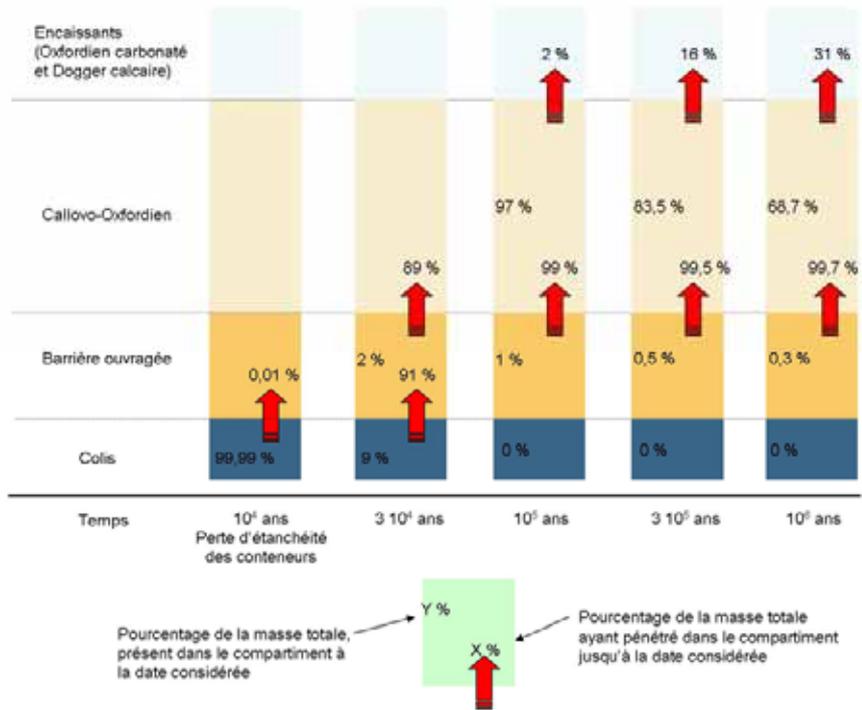


Figure 10.4.4 Répartition de la masse du chlore 36 entre les composants du stockage et la couche du Callovo-Oxfordien à différents temps, pour la zone de stockage des combustibles usés CUI. Les pourcentages incluent la masse disparue par décroissance radioactive (réalisé à partir de Andra, 2005m)

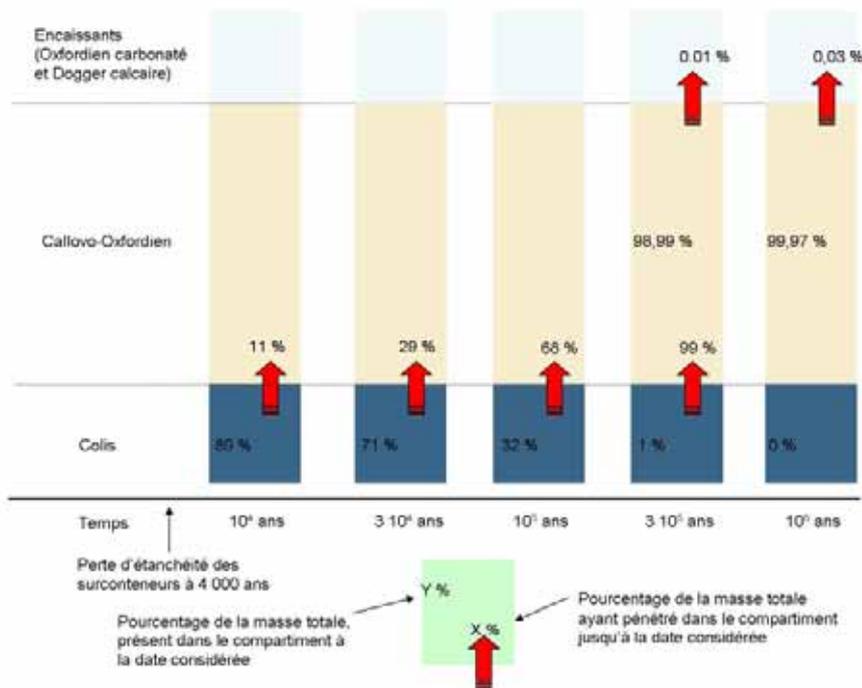


Figure 10.4.5 Répartition de la masse de sélénium 79 entre les composants du stockage et la couche du Callovo-Oxfordien, à différents temps, pour la zone de stockage des colis C1-C2. Les pourcentages incluent la masse disparue par décroissance radioactive (réalisé à partir de Andra, 2005m)

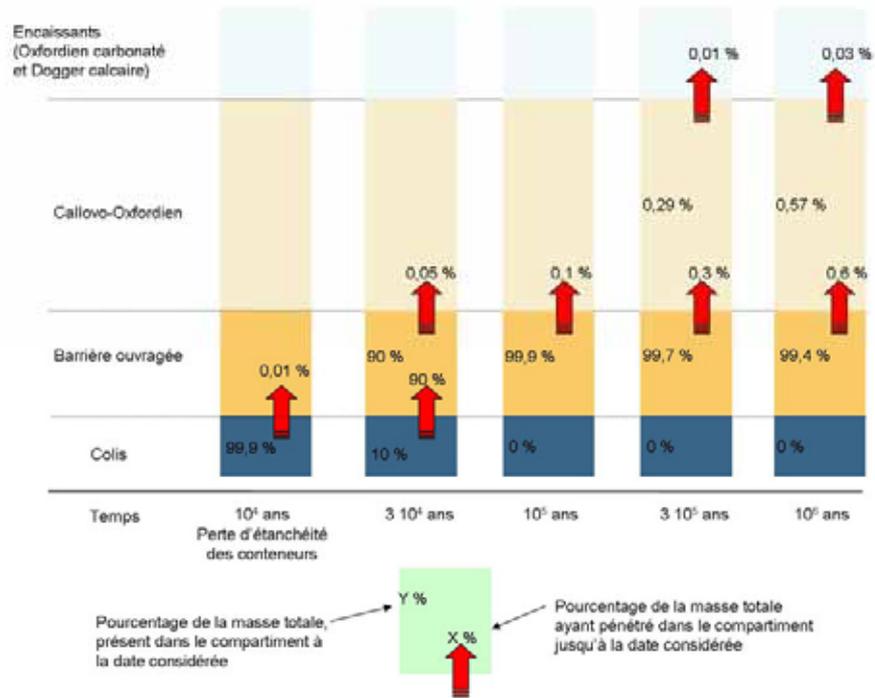


Figure 10.4.6 Répartition de la masse de sélénium 79 entre les composants du stockage et la couche du Callovo-Oxfordien, à différents temps, pour la zone de stockage des combustibles usés CUI. Les pourcentages incluent la masse disparue par décroissance radioactive (réalisé à partir de Andra, 2005m)

**Encadré 10.11 La solubilité et la sorption des radionucléides dans les argilites du Callovo-Oxfordien (1/2)**

De nombreuses études expérimentales ont été menées sur les capacités de rétention des argilites du Callovo-Oxfordien et la solubilité des radionucléides dans leurs eaux interstitielles ((Andra, 2005g ; Giffaut & Buschaert, 2005).

**L'iode et le Chlore**

Le *chlore* et l'*iode* ont des solubilités infinies. Ils ne présentent pas d'affinité vis-à-vis des phases argileuses des argilites du Callovo-Oxfordien.

**Les autres éléments**

- Le *césium* est totalement soluble, sous forme  $\text{Cs}^+$ . Sa rétention est pilotée par les processus d'échange d'ions sur les surfaces argileuses. La rétention du césium est directement dépendante de sa concentration en solution ; les résultats expérimentaux montrant une variation de plusieurs ordres de grandeur du coefficient de partage entre les échelles des traces et pondérale. Cette sorption est rendue par un modèle simplifié. Ainsi, pour des concentrations en césium inférieures à  $10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$ , la rétention du césium est très importante et varie entre  $\sim 0,9 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$  à  $\sim 0,1 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$  pour une concentration en césium variant respectivement entre  $10^{-9} \text{ mol.L}^{-1}$  et  $10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$ . Pour des concentrations supérieures à  $10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$ , la rétention du césium est plus faible, de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ .
- Le *bore* est stable sous une forme soluble (acide borique  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) et possède une solubilité infinie. Ses propriétés de sorption sur les argiles sont faibles, mais significatives ( $\sim 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ ).
- La solubilité du *carbone* inorganique ( $\sim 5 \cdot 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$ ) est gouvernée par la formation de calcite. Le comportement du carbone organique est piloté par la solubilité du composé organique (acide, alcool,...). Dans le cas de méthane, il se trouve sous forme gazeuse. Sa solubilité dans les eaux des argilites est alors proche de celle de l'hydrogène. Concernant ses processus de sorption, ils diffèrent selon la forme, organique ou non, sous laquelle il se trouve. Sous une forme organique, la sorption du carbone sur les argilites n'est pas évaluée à ce jour. Sous forme inorganique ( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ), la rétention du carbone s'effectue principalement par échange isotopique avec les solides carbonatés du milieu (calcite, dolomite). Au vu des temps de résidence longs des solutions dans les argilites (au minimum 100 000 ans), ce processus n'est pas négligeable et conduit à un coefficient de partage de l'ordre de  $10^{-3} - 10^{-2} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ .
- La solubilité de l'*uranium* est pilotée par la phase  $\text{UO}_{2+x(\text{fuel})}$ , intermédiaire entre les espèces amorphes et cristallisées. La solubilité de l'uranium est alors de l'ordre de  $10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}$ . La sorption de l'uranium sur les argilites, liée à la grande stabilité de l'espèce  $\text{U}(\text{OH})_4^0$ , est de l'ordre de  $10 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ .
- Le *sélénium* est très fortement influencé par les teneurs en fer. Dans un milieu riche en fer, les espèces  $\text{FeSe}$  et  $\text{FeSe}_2$  peuvent alors se former. Dans ces conditions, la solubilité du sélénium est d'environ  $5 \cdot 10^{-10} \text{ mol.L}^{-1}$ . De plus, le sélénium a tendance à co-précipiter avec la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) et la pyrrhotite ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ,  $0 < x < 0,2$ ). Dans ce cas, la solubilité du sélénium diminue d'environ 4 ordres de grandeur. La sorption du sélénium sous son degré d'oxydation -II sur les argilites n'est pas connue, elle est considérée comme nulle par manque de données.

**La solubilité et la sorption des radionucléides dans les argilites du Callovo-Oxfordien (2/2)**

- Les comportements en solution des *lanthanides trivalents* (samarium, europium, holmium et terbium) sont globalement semblables pour tous ces éléments. Leur solubilité est pilotée par les processus d'incorporation et de co-précipitation avec des solides calciques (phosphates de calcium, calcite, portlandite,...), ce qui conduit à des solubilités très faibles ( $\sim 10^{-12}$  mol.L<sup>-1</sup>). En ce qui concerne les propriétés de sorption des lanthanides sur les argilites du Callovo-Oxfordien, aucune mesure directe n'a été effectuée à ce jour, mais une analogie peut être faite avec les argiles à Opalinus (Nagra, 2003b). La sorption est très importante et correspond à un processus de complexation de surface : la valeur du coefficient de partage est d'environ 50 m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>.
- La solubilité du *plutonium* est très sensible aux conditions de pH, de redox et de teneurs en carbonates dans les conditions des argilites du Callovo-Oxfordien. Les conditions redox n'ont pas une grande influence sur la solubilité, même si son augmentation stabilise Pu<sup>IV</sup>, moins soluble que la forme Pu<sup>III</sup>. Avec des conditions redox fortement réductrices, la solubilité du plutonium est d'environ 2·10<sup>-7</sup> mol.L<sup>-1</sup> ; elle diminue jusqu'à environ 4·10<sup>-9</sup> mol.L<sup>-1</sup> si les conditions deviennent moins réductrices (Eh > -200 mV) ou plus basiques (pH > 7,5). L'évaluation de la sorption du plutonium sur les argiles découle de la présence de ces deux degrés d'oxydation III et IV. La sorption de Pu<sup>III</sup> est assimilée à celle de Am<sup>III</sup> qui est un analogue. Cette dernière est ainsi très importante (> 50 m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>). La sorption de Pu<sup>IV</sup> est quant à elle inférieure d'environ un ordre de grandeur ( $\sim 1$  m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>).
- L'*américium* est stable sous sa valence +III dans les conditions des argilites. La solubilité est proche de 10<sup>-10</sup> mol.L<sup>-1</sup>, en cohérence avec les expérimentations et les analogues naturels. La sorption de l'américium sur les illites du Puy, analogues des argilites conduit à un coefficient de partage de l'ordre de 50 - 110 m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>.

*Synthèse de la solubilité et de la rétention de certains radionucléides d'intérêt dans les argilites du Callovo-Oxfordien*

Elément	Solubilité (mol.L <sup>-1</sup> )	Kd (m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> )
Cl <sup>-I</sup>	infinie	0
B <sup>III</sup>	infinie	$\sim 4 \cdot 10^{-3}$
I <sup>-I</sup>	infinie	0
Cs <sup>I</sup>	infinie	$Kd_{equivalent} = \frac{A}{B + C_{sol}}$ Pour [Cs <sup>+</sup> ] ≤ 10 <sup>-5</sup> mol.L <sup>-1</sup> : A=1,8462·10 <sup>-7</sup> et B=4.7552·10 <sup>-7</sup> Pour [Cs <sup>+</sup> ] ≥ 10 <sup>-5</sup> mol.L <sup>-1</sup> : A=0,00012 et B=0,00492
Tc <sup>IV</sup>	$\sim 4 \cdot 10^{-9}$	$\sim 10$
C <sup>IV</sup>	$\sim 5 \cdot 10^{-5}$	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-2</sup>
Ni <sup>II</sup>	10 <sup>-5</sup> - 10 <sup>-6</sup>	$\sim 2 \cdot 10^{-1}$
Se <sup>-II</sup>	5·10 <sup>-10</sup> – 10 <sup>-14</sup>	0*
Zr <sup>IV</sup>	10 <sup>-11</sup> – 3·10 <sup>-6</sup>	qq 10
Nb <sup>V</sup>	$\sim 2 \cdot 10^{-7}$	$\sim 1,2$
U <sup>IV</sup>	$\sim 10^{-7}$	$\sim 10$
Sm <sup>III</sup>	$\sim 10^{-12}$	$\sim 50$
Eu <sup>III</sup>	$\sim 10^{-12}$	$\sim 50$
Tb <sup>III</sup>	$\sim 10^{-12}$	$\sim 50$
Ho <sup>III</sup>	$\sim 10^{-12}$	$\sim 50$
Th <sup>IV</sup>	$\sim 10^{-9}$	$\sim 60$
Np <sup>IV</sup>	$\sim 4 \cdot 10^{-9}$	$\sim 1$
Pu <sup>III</sup> / Pu <sup>IV</sup>	2·10 <sup>-7</sup> - 4·10 <sup>-9</sup>	$\sim 1 - \sim 50$
Am <sup>III</sup>	$\sim 10^{-10}$	$\sim 50 - \sim 110$

\*Valeur prise nulle par manque de données

## 10.5 Le transfert des radionucléides en solution dans les formations encaissantes

### 10.5.1 Les caractéristiques générales du transfert dans les formations encaissantes et les effets de l'évolution géodynamique

#### 10.5.1.1 L'organisation générale des écoulements et du transfert des solutés

La description du milieu géologique à l'état initial (cf. § 3.6) montre que les écoulements dans les encaissants sont essentiellement horizontaux et s'organisent dans des séries de niveaux poreux plus transmissifs. Le transport des solutés y est convectif, mais il est lent, de sorte qu'il apparaît une composante verticale de transport correspondant à la dispersion dans les niveaux poreux transmissifs et à la diffusion entre ces niveaux transmissifs, notamment dans les niveaux plus argileux. Le transfert dans les encaissants se fait donc globalement selon deux composantes, l'une convective horizontale, l'autre diffusive verticale.

- Les écoulements et le transfert des solutés dans le Dogger

Les gradients de charge dans le Dogger sont très faibles, de l'ordre de  $10^{-3} \text{ m.m}^{-1}$ , et les perméabilités ne sont pas très élevées (environ  $10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$  dans les couches les plus transmissives). Les vitesses d'écoulement de l'eau au sens de Darcy, quasi horizontales au sein des niveaux transmissifs, sont de l'ordre de quelques centaines de mètres par millions d'années (quelques kilomètres par million d'années pour la vitesse de transport convectif d'un soluté non sorbé). Les directions d'écoulement sont globalement vers l'Ouest-Sud-Ouest. Sur la verticale vers les formations sous-jacentes, le transport des solutés est dominé par la diffusion.

- Les écoulements et le transfert dans l'Oxfordien carbonaté et les formations sus-jacentes

Les vitesses d'écoulement de l'eau au sens de Darcy dans les niveaux poreux de l'Oxfordien carbonaté sont de l'ordre du kilomètre par million d'années, soit des vitesses de transport convectif d'un soluté non sorbé de l'ordre du kilomètre par centaine de milliers d'années (cf. § 3.3.2.2). À l'actuel, les écoulements en aval du laboratoire de recherche souterrain sont dirigés globalement d'une part, vers la Marne, à l'Ouest et, d'autre part, suivant des trajectoires régionales Nord-Ouest.

Le comportement des solutés dans l'Oxfordien carbonaté est globalement similaire à celui dans le Dogger. Néanmoins, deux nuances importantes apparaissent : **(i)** une partie des solutés peut migrer par diffusion à travers le Kimméridgien marneux jusqu'aux aquifères de surface dans le Tithonien (Figure 10.5.1), et **(ii)** les écoulements dans l'Oxfordien carbonaté sont influencés par les évolutions climatiques et les évolutions géomorphologiques, à partir de 300 000 ans environ.

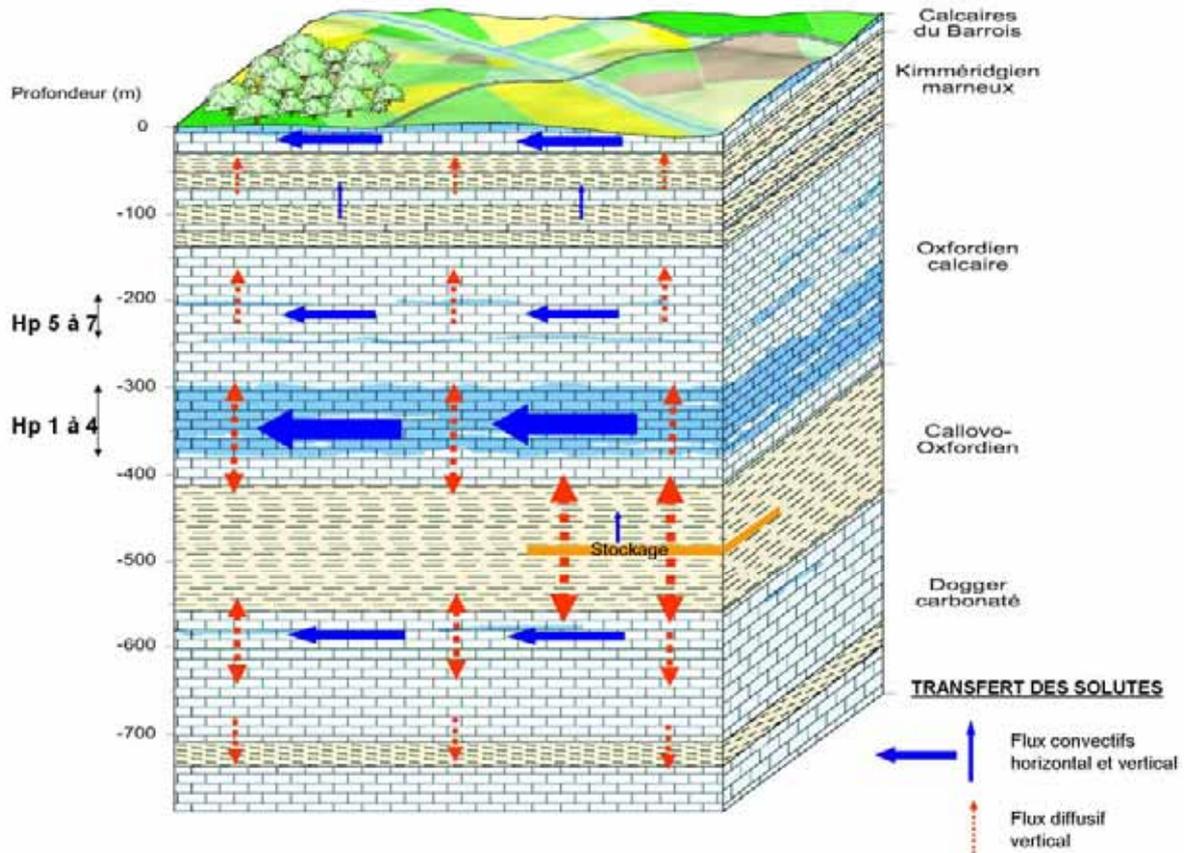


Figure 10.5.1 Organisation des composantes convectives (horizontales et verticales) et diffusives (essentiellement verticales) du transport dans le Callovo-Oxfordien et dans les formations encaissantes (les tailles des flèches sont représentatives de l'intensité des composantes du transport dans les différentes formations)

### 10.5.1.2 La rétention dans les encaissants

On ne dispose pas de mesure de la rétention dans les encaissants sus-jacents du Callovo-Oxfordien sur la zone de transposition. Cependant, il est vraisemblable que les niveaux marneux du Kimméridgien ou les niveaux argileux du mur de l'Oxfordien carbonaté (faciès de base C3a / C3b) présentent des propriétés de rétention importantes, pouvant conduire à des temps de transfert de plusieurs centaines de milliers d'années dans ces formations (Buschaert & Giffaut, 2005).

Par ailleurs, les échantillons prélevés dans le forage EST205 montrent des valeurs assez faibles (de quelques  $10^{-11}$  à quelques  $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  pour l'eau tritiée, de  $10^{-12}$  à  $10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  pour le  $^{36}\text{Cl}$ ) du coefficient de diffusion dans les faciès C3a / C3b (Trouiller & Benabderrahmane, 2005). Bien que ces données ne puissent être extrapolées sur toute la zone de transposition du fait de la variabilité de ces formations, avec les faibles valeurs de la perméabilité de ces faciès (de l'ordre de  $10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), elles concourent probablement à un lent transfert par diffusion à la base de l'Oxfordien carbonaté.

Dans la suite de l'analyse, on ne tient pas compte de propriétés de rétention dans les encaissants de la couche du Callovo-Oxfordien.

### 10.5.1.3 L'influence des phénomènes géodynamiques

- Les changements climatiques

Les changements climatiques affectent directement les écoulements dans les aquifères de surface car les périodes de forte glaciation impliquent la présence d'un pergélisol continu sur des épaisseurs pouvant être plurihénométriques.

En présence d'un pergélisol continu, les infiltrations d'eau vers les aquifères profonds ne sont plus possibles. Les nappes n'étant plus rechargées, l'équilibre hydraulique est modifié (Figure 10.5.2). Le site de Meuse / Haute-Marne se trouve dans la partie amont du bassin de Paris. Dès lors, les nappes souterraines, en particulier celles de l'Oxfordien carbonaté et du Dogger, ont tendance à se vider vers les exutoires régionaux que sont la Manche et le seuil du Poitou. Les charges hydrauliques vont donc baisser dans le secteur du site. Pendant la période de réchauffement suivante, l'arrivée de l'eau est à nouveau possible et le phénomène inverse se produit ; les charges hydrauliques augmentent dans le secteur du site. Les battements périodiques des nappes qui en résultent ont des longueurs d'onde temporelles de l'ordre de la centaine de milliers d'années et des amplitudes plurimétriques (ANTEA, 1999).

Les écoulements depuis le site en direction des exutoires naturels correspondent à des temps de transfert convectif d'un soluté non sorbé de l'ordre de la centaine de milliers d'années (ce qui est le cas à l'actuel). Ils ne seraient donc pas significativement influencés par ces changements climatiques. L'exutoire naturel de la Saulx possible à l'horizon du million d'années, correspond à des temps de transfert de quelques dizaines de milliers d'années. Dans le cas de l'installation d'un pergélisol, les vitesses d'écoulement le long des trajectoires vers la Saulx pourraient localement diminuer d'un facteur 2 à 3 au cours d'une période glaciaire (ANTEA, 1999).

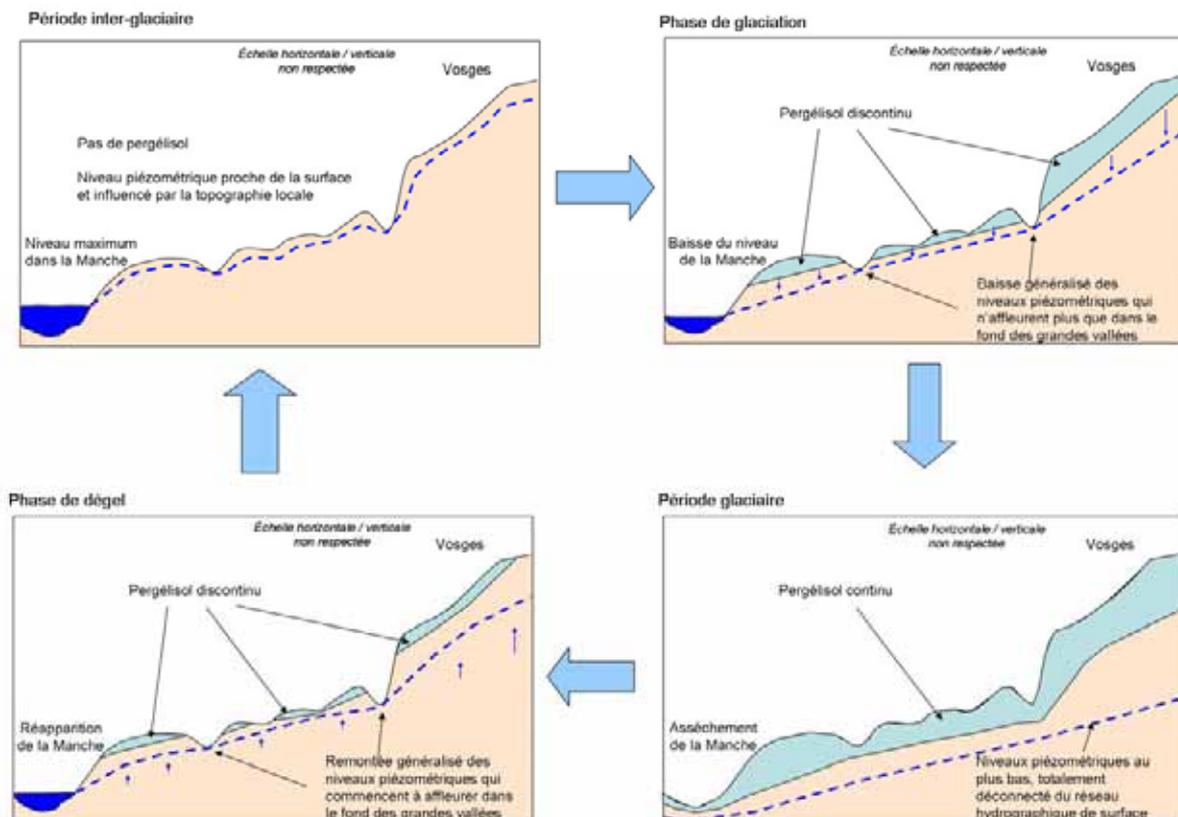


Figure 10.5.2 Schéma du processus de battement d'un aquifère à l'échelle régionale au cours d'un cycle glaciaire

Un autre effet du pergélisol est d'empêcher les solutés migrant par diffusion depuis l'Oxfordien carbonaté vers le Tithonien à travers le Kimméridgien de se diluer dans l'eau des nappes de surface car elles sont gelées. Il s'ensuit une augmentation de leur concentration dans l'eau liquide sous le pergélisol. Cependant, un pergélisol continu ne perdure que pendant quelques milliers d'années au maximum. En effet, un cycle glaciaire, d'une durée moyenne de cent mille ans, contient plusieurs sous cycles, d'intensités différentes, incluant chacun une période plus ou moins froide et une période plus ou moins chaude, séparées par des périodes de transitions. Chacune de ces sous-périodes, froide ou chaude, est d'une durée moyenne de plusieurs milliers d'années. Ces durées sont faibles par rapport au temps de transfert diffusif à travers le Kimméridgien, qui est de quelques dizaines de milliers d'années au minimum. Le temps pouvant conduire à l'accumulation des solutés n'est donc pas significatif par rapport au temps de transit total à travers le Kimméridgien. Cet effet est donc négligeable.

Les estimations actuelles de la profondeur maximale que peut atteindre un pergélisol sur le secteur du site font état de 300 m au maximum pour la profondeur de l'isotherme 0 °C (cf. § 9.4.1). La couche du Callovo-Oxfordien n'est pas affectée par ce phénomène, mais un impact sensible est possible pour les nappes de l'Oxfordien carbonaté. Néanmoins, à de telles profondeurs, les conditions de pression impliquent que la glace se concentre dans les fractures, les fissures et les microfissures. La totalité de l'eau présente dans l'Oxfordien carbonaté ne sera donc pas gelée. Il n'existe pas à l'heure actuelle d'estimation de l'impact d'un pergélisol sur la perméabilité « en grand » de l'Oxfordien carbonaté, ni sur l'effet potentiel des hydrates de gaz (cf. § 9.4.1) mais il est peu probable que les écoulements cessent totalement, notamment dans les horizons poreux inférieurs (Hp1 à Hp4). Si cela était le cas, la durée de ce phénomène qui ne se produirait qu'au plus fort de la glaciation, ne serait que de quelques milliers d'années, sur l'ensemble d'un cycle glaciaire d'une durée d'environ cent mille ans. Cela n'aurait pas d'impact sur les écoulements et sur la concentration des radionucléides pour des durées de transfert de plusieurs centaines de milliers d'années.

- L'influence de l'érosion de surface

La description de l'évolution géodynamique de surface (cf. § 9.5) sur le prochain million d'années montre que les évolutions climatiques, notamment l'alternance des cycles de gel et de dégel lors des glaciations, modifient sensiblement la topographie en accentuant l'érosion, notamment en fonds de rivières. Ces transformations des conditions aux limites de surfaces influencent progressivement les écoulements dans l'Oxfordien carbonaté. Le recul des côtes du Tithonien et l'érosion en fonds de vallées permettent, en de nombreux endroits du secteur, une altération de surface des marnes calcaires du Kimméridgien, dont la perméabilité augmente sensiblement. De nouveaux exutoires liés au transport convectif des solutés dans les strates transmissives de l'Oxfordien carbonaté apparaissent alors en aval du site de stockage (Figure 10.5.3). Des exutoires naturels dans la vallée de l'Ornain au Nord-Ouest du site deviennent alors possibles après une érosion consécutive à plusieurs cycles glaciaires (soit au-delà de plusieurs centaines de milliers d'années) (LSCE / CEA, 2004). Ils se développent au détriment des trajectoires régionales, qui disparaissent à l'horizon du million d'années. Pour leur part, les directions d'écoulement vers la vallée de la Marne restent pérennes sur la période. Par ailleurs, l'érosion du Kimméridgien marneux dans le cours supérieur de la vallée de la Saulx à l'Ouest du site de Meuse / Haute-Marne, pourrait aussi conduire, à l'horizon du million d'années, à l'apparition d'un exutoire naturel. Il se développerait au détriment des trajectoires vers la vallée de la Marne, conduisant alors à des temps de transfert convectif d'un soluté non sorbé de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'années depuis le site vers cet exutoire local.

Ainsi, au droit du site, un soluté partant à l'actuel du toit du Callovo-Oxfordien pourrait initialement prendre une trajectoire régionale vers le centre du Bassin de Paris, puis, quelques centaines de milliers d'années plus tard, prendre une trajectoire locale vers l'Ornain, au fur et à mesure de l'érosion des marnes calcaires du Kimméridgien.

### 10.5.2 Le transfert des radionucléides mobiles sortant de la couche du Callovo-Oxfordien

Les radionucléides qui diffusent à travers la couche du Callovo-Oxfordien depuis le stockage, se répartissent à parts égales de part et d'autre du stockage, vers l'Oxfordien carbonaté sus-jacent et vers le Dogger sous-jacent. Les temps de transfert et les débits de concentration au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien sont identiques pour chaque radionucléide considéré. À l'échelle de la zone de transposition, on peut donc décrire de manière indépendante le transfert des radionucléides dans les encaissants sus-jacents et dans les encaissants sous-jacents.

Comme indiqué plus haut, les radionucléides qui atteignent le toit et le mur du Callovo-Oxfordien sont principalement les radionucléides mobiles à vie longue,  $^{129}\text{I}$  et  $^{36}\text{Cl}$ , et dans une moindre mesure le  $^{79}\text{Se}$ . Les caractéristiques générales des écoulements et du transfert des solutés dans les encaissants indiquent que le transfert de ces radionucléides présentera une extension verticale importante, tant dans les encaissants sous-jacents que dans les encaissants sus-jacents, entraînant une dispersion spatiale des radionucléides.

#### 10.5.2.1 Le transfert dans les encaissants sous-jacents

À la verticale des zones de stockage, les radionucléides migrent principalement par diffusion vers le Lias sous-jacent. Néanmoins, l'écoulement horizontal permet le transfert convectif horizontal d'une fraction des radionucléides. À une distance horizontale plurikilométrique des zones de stockage, les concentrations en solutions deviennent plus faibles au-dessus et en dessous de ces horizons. Le panache de radionucléides peut alors s'étendre verticalement par diffusion vers le bas, dans le Lias sous-jacent, et vers le haut, dans le Callovo-Oxfordien (Figure 10.5.1).

Sur le million d'années, les radionucléides ont ainsi migré (i) horizontalement sur quelques kilomètres et (ii) verticalement sur toute l'épaisseur du Dogger (250 m de puissance) et dans une grande partie du Lias sous-jacent. Une plus faible partie des radionucléides peut migrer à nouveau vers la couche du Callovo-Oxfordien.

#### 10.5.2.2 Le transfert dans les encaissants sus-jacents

Les temps des maxima des débits molaires en sortie du Callovo-Oxfordien sont de l'ordre de 250 000 ans. À l'actuel, il existe depuis le site deux directions d'écoulement, l'une locale vers la Marne, l'autre régionale vers le Nord-Ouest. Les évolutions géodynamiques font apparaître deux nouveaux exutoires locaux, (i) l'un est situé au Nord dans l'Ornain et se développe au détriment de la direction régionale à partir de 500 000 ans environ, (ii) l'autre est situé immédiatement à l'Ouest du site dans le cours supérieur de la Saulx et se développe à l'horizon du million d'années sur une partie des trajectoires des écoulements vers la Marne.

Ainsi, jusqu'à 300 000 ans, environ, les radionucléides mobiles qui sont arrivés dans l'Oxfordien carbonaté suivent soit la direction régionale vers le Nord-Ouest, soit la direction locale vers la vallée de la Marne. À partir de 300 000 ans, la direction régionale disparaît progressivement au profit de l'exutoire local de l'Ornain au Nord du site. À l'horizon du million d'années, il en va de même pour la direction locale vers la Marne au profit de l'exutoire de la Saulx. Dès lors, il n'y a plus que deux directions : l'une vers l'Ornain et l'autre vers La Saulx. Par conséquent, à partir de 300 000 ans, les radionucléides qui arrivent dans l'Oxfordien vont suivre les trajectoires d'abord en direction de l'Ornain et de la Marne, puis, à l'horizon du million d'années vers l'Ornain et la Saulx. Les radionucléides qui, avant 300 000 ans, ont suivi la direction régionale, restent globalement sur cette dernière (Figure 10.5.3).

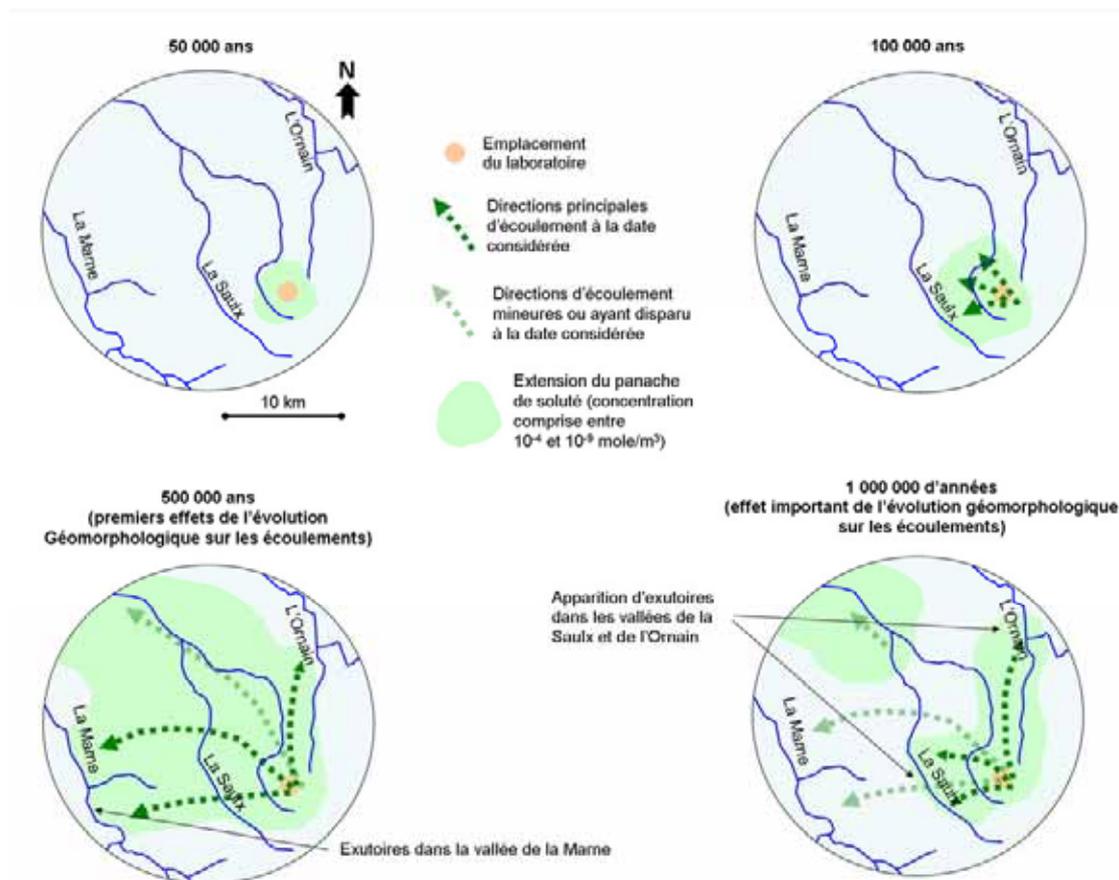


Figure 10.5.3 Représentation schématique de l'évolution des trajectoires d'un panache de solutés dans l'Oxfordien carbonaté en aval du site de Meuse / Haute-Marne sur le prochain million d'années

Ces différentes directions correspondent à des temps de transfert convectif moyens (correspondant aux maxima de débit molaire) depuis l'aplomb du site (i) de l'ordre du million d'années pour l'exutoire naturel de la vallée de la Marne (exutoire à l'actuel), (ii) de quelques centaines de milliers d'années pour l'exutoire futur de la vallée de l'Ornain et (iii) de quelques dizaines de milliers d'années pour l'exutoire futur de la vallée de la Saulx.

Moins d'une dizaine de pourcents des radionucléides qui migrent horizontalement par convection dans les niveaux transmissifs peuvent être entraînés par diffusion dans les couches sus-jacentes. Une fraction moins importante encore peut diffuser vers le bas, vers la couche du Callovo-Oxfordien, lorsque les concentrations deviennent faibles dans ce dernier, à quelques kilomètres des zones de stockage.

Les radionucléides qui diffusent vers le Kimméridgien peuvent remonter progressivement vers la surface. Il n'existe pas à l'heure actuelle de mesure du coefficient de diffusion effectif, ni de mesure de la porosité accessible à la diffusion pour le Kimméridgien marneux. Dans cette formation, les perméabilités sont faibles (environ  $10^{-12}$  m.s<sup>-1</sup>, cf. § 3.3.2.3) et le pourcentage d'argile du même ordre de grandeur que celui du Callovo-Oxfordien. Il est donc possible d'envisager des coefficients de diffusion effectif du même ordre de grandeur que ceux du Callovo-Oxfordien. ce qui augmenterait les durées de migration vers le Tithonien. Quoiqu'il en soit, les radionucléides qui atteindraient les aquifères de surface après avoir diffusé verticalement à travers les marnes du Kimméridgien se retrouveraient fortement dilués en surface au droit du stockage.

Quelle que soit la trajectoire considérée, les radionucléides sont naturellement dilués par les eaux qu'ils rencontrent le long de leur trajet dans les encaissants :

- dans les niveaux poreux de l'Oxfordien carbonaté dès la sortie de la couche du Callovo-Oxfordien. Compte tenu des débits dans l'Oxfordien carbonaté, cette dilution est estimée à deux ordres de grandeur ;
- lors du trajet horizontal dans l'Oxfordien carbonaté. La dilution peut atteindre un facteur dix à une dizaine de kilomètres en aval du site ;
- dans les aquifères de surface au niveau des alluvions de la Marne ou des calcaires du Tithonien. Les contrastes de perméabilité sont tels entre les calcaires de l'Oxfordien carbonaté sous couverture et les alluvions à l'affleurement, que le facteur de dilution peut être estimé à trois à quatre ordres de grandeur ;
- dans les rivières. Les rapports entre les débits des rivières et les débits drainés par les cours d'eau dans les nappes alluviales permettent d'estimer cette dilution à trois à quatre ordres de grandeur.

## 10.6 Le transfert des radionucléides vers la biosphère et l'homme

La biosphère représente le dernier compartiment du transfert des radionucléides vers l'homme. Les interfaces naturelles avec la géosphère sont représentées par le sommet de la nappe libre de surface, lorsque cette dernière se trouve dans les Calcaires du Barrois (sur les plateaux), par les exutoires de cette nappe en flanc de vallées ou encore par les exutoires des nappes plus profondes, notamment les fonds de vallées pour les calcaires de l'Oxfordien carbonaté.

Ainsi que l'indique le paragraphe précédent, les radionucléides issus du stockage et susceptibles d'atteindre la biosphère, avec une concentration significative, sont en nombre très réduit : il s'agit de l'iode, du chlore, et du sélénium pour les radionucléides et du bore pour les toxiques chimiques.

Le paragraphe 10.5 a également mis en évidence l'étalement spatial du panache de radionucléides parvenant à cette interface à la suite du transport dans le Callovo-Oxfordien et les encaissants. Dans les encaissants, une fraction de ces solutés migre horizontalement dans l'Oxfordien carbonaté et, sur le secteur, arrive en surface vers la vallée de la Marne, ou vers les vallées de l'Ornain et de la Saulx si l'on tient compte des modifications géomorphologiques sur le prochain million d'années. Une plus faible partie migre verticalement au travers du Kimméridgien, par diffusion, et se disperse dans la nappe superficielle des Calcaires du Barrois qui montre de multiples exutoires dans les vallées qui entaillent les plateaux. Cet étalement du panache dans l'aquifère de surface implique que différents environnements de surface sont concernés en terme d'exutoires potentiels. Selon ces zones, les possibilités d'accès à des ressources en eau souterraine sont différentes, ainsi que, d'une manière générale, les caractéristiques des environnements de surface (sols, cultures, faune, occupations humaines,...) (cf. § 3.5). Sur les zones de plateaux, qui correspondent à l'environnement largement majoritaire à l'échelle du secteur, la nappe des Calcaires du Barrois est présente de 10 à 15 m en dessous de la surface du sol. Dans les zones de vallées, correspondant à des exutoires naturels de la nappe de surface, les eaux transportant les solutés arrivent directement en surface, puis s'écoulent dans les rivières.

De plus, le flux arrivant à la nappe superficielle ou aux exutoires montre un étalement temporel important : celui-ci est de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'années (cf. § 10.5). Ceci implique que le transfert en surface de radionucléides ne se produit pas dans une biosphère unique et pérenne pour un domaine géomorphologique donné, mais au travers d'une succession de biosphères alternativement tempérées puis froides (boréales puis toundra), couvrant plusieurs cycles climatiques de 100 000 ans (cf. § 9.4).

Enfin, les évaluations des temps de transfert des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien et les encaissants présentées dans les paragraphes 10.4 et 10.5 (plusieurs centaines de milliers d'années) sont à mettre en regard de la durée d'une éventuelle perturbation d'origine anthropique des cycles climatiques glaciaire-interglaciaire de 100 000 ans. Les paragraphes 10.4 et 10.5 ont montré que cette perturbation anthropique est susceptible de modifier fortement les alternances climatiques des prochains 300 000 ans, avec pour cette période, une biosphère tempérée dominante. Jusqu'à 600 000 ans, les perturbations s'estompent et les cycles naturels reprennent au-delà. La majeure partie du flux des radionucléides arrive donc à la biosphère après les effets les plus marquants de cette éventuelle perturbation, alors que les cycles climatiques retrouvent leur évolution naturelle.

Ce paragraphe pose d'abord le cadre général du transfert des radionucléides dans la biosphère. Il aborde ensuite les effets des différentes situations géomorphologiques sur les transferts dans la biosphère des radionucléides y parvenant. Ces effets sont analysés dans le cadre d'une biosphère tempérée. Enfin, les conséquences des évolutions climatiques sur le transfert de ces éléments sont évaluées.

**10.6.1 Le modèle global de transfert des radionucléides dans la biosphère : transferts directs et indirects**

Le transfert des radionucléides dans la biosphère met en jeu un grand nombre d'actions et de rétroactions entre les différents compartiments du milieu vivant (Albrecht & Gallerand, 2005 ; IAEA, 2003). Un exemple sur quelques composants est présenté ci-dessous sous forme matricielle (Figure 10.6.1).

	1	2	3	4	5	6
A	<b>Eau de puits Aquifères</b>		Irrigation	aspersion	Alimentation	
B		<b>Atmosphère</b>	Dépôt	Dépôt, Photo- synthèse		
C	Lixiviation	Suspension, Volatilisation	<b>Sol Cultivé</b>	Transfert racinaire	Erosion	
D		Transpiration	Lessivage, feuilles mortes	<b>Végétaux et produits végétaux</b>		
E	Recharge		Inondation, Sédimen- tation		<b>Eau de Rivière</b>	Dépôt
F		Suspension	Conversion		Resuspension	<b>Sédiments</b>

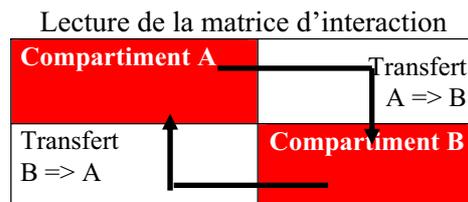


Figure 10.6.1 Modèle de transfert des radionucléides sous forme matricielle dans quelques compartiments de la biosphère (IAEA, 2003)

L'analyse fine de chacun de ces phénomènes a permis de proposer un schéma générique, permettant de rendre compte des grandes voies de transfert dans la biosphère (Albrecht & Gallerand, 2005). Ce schéma, qui structure ce paragraphe, est présenté Figure 10.6.2.

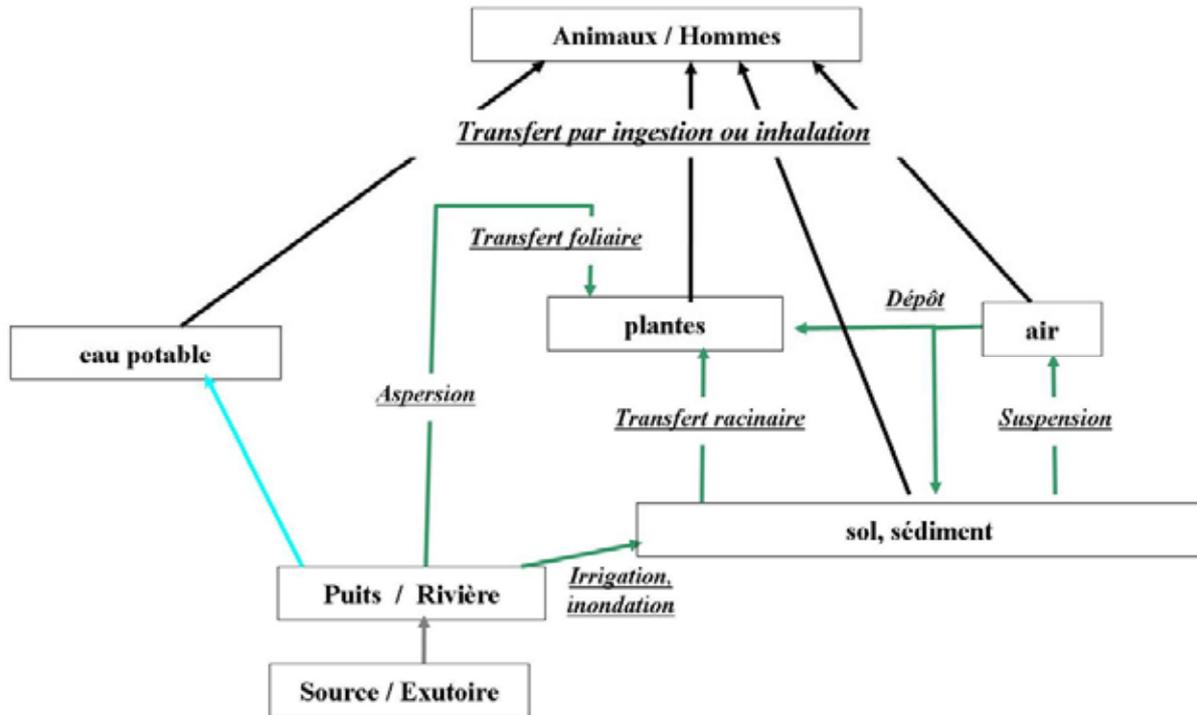


Figure 10.6.2 Principales voies de transfert des radionucléides dans la biosphère

De manière directe, les radionucléides contenus à l'état de traces dans l'eau des nappes peuvent être immédiatement transférés à l'homme :

- cette eau peut être captée par des forages et ingérée directement par l'homme (eau de boisson) ou les animaux ;
- aux exutoires des nappes, l'eau transportant les radionucléides arrive en surface sous forme de sources, ou de résurgences karstiques selon le cas, puis s'écoule dans les rivières. Cette eau peut également être directement ingérée par l'homme, comme dans le cas précédent, éventuellement après potabilisation. Les concentrations en radionucléides peuvent dans ce cas être diluées, du fait du débit des rivières.

De manière plus indirecte, le transfert se fait par le sol (Encadré 10.12). Ce compartiment, qui peut permettre des accumulations, montre un certain nombre d'actions et de rétroactions, notamment avec l'atmosphère.

*Encadré 10.12 Le modèle de transfert des radionucléides dans les sols*

Dans le sol, un grand nombre de mécanismes physico-chimiques conduisent à la mobilisation ou l'immobilisation des éléments en traces. Ces phénomènes recouvrent à la fois des réactions de dissolution / précipitation et des réactions d'adsorption / désorption sur les phases solides (Bourrelier & Berthelin, 1998), comme dans le stockage ou le milieu géologique (cf. § 10.3.3 et 10.4)

Ces réactions sont notamment conditionnées par :

- les conditions acido-basiques du sol (pH) jouent sur la spéciation,
- le potentiel redox, un milieu oxydant, comme c'est le cas pour les sols du secteur de Meuse / Haute-Marne, augmentant la mobilité des ions libres,
- les teneurs en carbonates, en oxydes métalliques ou encore en matière organique, ces éléments pouvant s'associer à certains radionucléides, selon les conditions redox du milieu et donc modifier leur mobilité,
- les teneurs et les types de minéraux présents dans le sol, dont certaines phases (argiles notamment) contrôlent les phénomènes d'adsorption de certains éléments traces.

Enfin, il convient de mentionner le rôle des micro-organismes qui interviennent directement ou indirectement dans les transformations minérales (dissolution, altération,...) ou modifient le statut des différents éléments présents (soluble / insoluble, oxydé / réduit,...).

D'une manière générale, le comportement d'un sol est décrit par un modèle de sorption instantanée et réversible, à l'image de ce qui est considéré dans le milieu géologique (Encadré 10.6). On utilise de ce fait le même type de paramètre pour exprimer le partage entre la phase solide et la phase liquide : le coefficient de distribution (Kd). Ce coefficient macroscopique permet l'intégration des nombreux phénomènes physico-chimiques contrôlant le comportement des éléments traces dans les sols.

Lorsqu'ils sont peu sorbés sur les sols et donc essentiellement dans la phase liquide, les radionucléides peuvent être prélevés par les végétaux. Une partie peut également être lixiviée, lors des épisodes pluvieux par exemple et réentraînée vers le sous-sol. Le modèle global de transfert dans les sols est donc un modèle dynamique dépendant des interactions entre particules solides et éléments en solution mais également du bilan hydrique et des modes d'utilisation des sols (types et modes de cultures).

Le comportement dans les sols des radionucléides est par conséquent propre à chaque élément.

- D'une manière générale, l'iode fait partie des éléments les plus faiblement retenus dans les sols (Deneux-Mustin *et al.*, 2003). Sa rétention dépend peu du pourcentage d'argiles dans le sol mais semble plutôt liée à la teneur en matière organique avec laquelle cet élément s'associe à l'état anionique. Les micro-organismes semblent impliqués directement dans les processus de séquestration de l'iode dans les sols. Des relations directes ont pu ainsi être mises en évidence entre la quantité de biomasse microbienne et les valeurs de Kd.
- Le chlore est considéré comme inerte vis-à-vis des réactions chimiques et biologiques, même si une association avec des molécules organiques, par réactions chimiques ou microbiennes, a pu être mise en évidence (Andra, 2003a). Cet élément est naturellement très présent, sous forme stable ( $^{35}\text{Cl}$  et  $^{37}\text{Cl}$ ), dans l'environnement, très soluble et très mobile. Il reste donc en solution et ne s'accumule pas dans les sols (sauf à considérer des phénomènes de précipitation, peu probables étant données les quantités nécessaires). Il est donc possible d'estimer le transfert du  $^{36}\text{Cl}$  d'un compartiment à l'autre en se basant sur l'égalité des rapports isotopiques  $^{36}\text{Cl}/(^{35}\text{Cl}+^{37}\text{Cl})$  (Albrecht & Gallerand, 2005). Ainsi, dans la biosphère, les sources de  $^{36}\text{Cl}$  provenant du stockage sont diluées par les sources de chlore stable pour chacun des compartiments. Dans les sols, les

principales sources d'apport d'eau contenant du  $^{36}\text{Cl}$  issu du stockage (apport sous forme d'arrosage ou d'irrigation par exemple – voir ci-dessous) sont ainsi diluées par les eaux des précipitations.

- Le sélénium montre un comportement très différent dans les sols selon la forme chimique présente, dépendant de son degré d'oxydation : sous forme d'ion sélénite  $\text{Se}^{\text{IV}}$ , il est moins mobile que sous forme séléniat  $\text{Se}^{\text{VI}}$  (Andra, 2003a).
- Le bore semble pouvoir se fixer sur un certain nombre de phases porteuses : hydroxydes de fer ou d'aluminium, argiles ou encore matière organique. Néanmoins, à partir des analyses disponibles, si les sols argileux sorbent mieux cet élément que les sols sableux (Deneux-Mustin *et al.*, 2003), le bore apparaît cependant comme un élément relativement mobile, avec de très faibles  $K_d$  dans l'ensemble (Andra, 2003a).

À partir du sol, les principales voies de transfert vers l'homme sont soit directes (par ingestion ou inhalation après mise en suspension dans l'air), soit indirectes via les végétaux (Encadré 10.13).

Pour les quatre éléments considérés, les participations respectives des transferts foliaire et racinaire sont très différentes (Deneux-Mustin *et al.*, 2003). En général, le transfert racinaire est limité par les capacités du sol à fournir les radionucléides. Pour l'iode, ce transfert est faible d'une manière générale, la majorité de l'iode paraissant retenue au niveau des racines. La plus grande partie du chlore (stable ou non) dans les plantes provient du sol, montrant que pour cet élément l'apport par voie aérienne n'est pas significatif. Le sélénium montre des transferts sols-plantes très variables selon le type de sol, la concentration en sélénium dans celui-ci ou encore le type de plante. D'une manière générale, le comportement du sélénium est directement dépendant des micro-organismes du sol. Le bore, peu sorbé dans les sols, est un élément essentiel au développement des végétaux. À ce titre, il est facilement prélevé par les racines et largement distribué dans les parties supérieures des plantes, en particulier dans le cas de certains légumes feuilles et de certains fruits (riches en polyols) (Andra, 2003a). Le transfert du bore à partir des feuilles est peu documenté.

Concernant les sols et les plantes, une autre voie possible d'apport est constituée par le dépôt de particules solides, remises en suspension dans l'atmosphère. Ces dépôts peuvent se faire soit sur les feuilles, soit sur les sols. Les quantités de radionucléides ainsi transportées sont faibles. Elles sont de plus diluées dans la totalité des particules en suspension.

À partir des plantes, les radionucléides sont mobilisables pour les animaux, puis l'homme, principalement par ingestion (Figure 10.6.2).

**Encadré 10.13 Le modèle de transfert des radionucléides aux végétaux**

Les transferts aux végétaux se font essentiellement selon deux voies principales : par les racines, à partir des éléments en solution dans le sol, et par les feuilles, à partir de l'interception directe de l'eau d'arrosage par les parties aériennes de la plante (Albrecht & Gallerand, 2005).

Dans les sols, la mobilisation des éléments en solution, ou faiblement adsorbés sur les phases solides, leur transport par advection ou diffusion vers la zone racinaire ou rhizosphérique, leur prélèvement par le végétal et leur distribution au travers de celui-ci relèvent d'un certain nombre de phénomènes complexes. Ceux-ci dépendent non seulement de la mobilité spécifique des éléments présents dans le sol mais également des types de plantes envisagés, des pratiques agricoles, des conditions climatiques, ... (Bourrelier & Berthelin, 1998).

Avant d'atteindre la zone racinaire, les éléments en solution dans le sol, ou faiblement sorbés, sont soumis à des conditions spécifiques régnant au voisinage de celle-ci (la rhizosphère), créées entre autres par l'exsudation racinaire. Les composés produits par la plante peuvent selon les cas, mobiliser ou immobiliser les éléments en traces.

Dans cette zone, la présence de carbone assimilable contribue à l'augmentation du nombre de micro-organismes (bactéries, champignons), qui jouent également leur rôle dans le transfert à la plante (augmentation de la biodisponibilité).

À l'intérieur de la plante, le transfert des radionucléides est conditionné par la structure interne de celle-ci (espaces intercellulaires, rôle des différentes membranes, ...) ainsi que par la présence de molécules assurant ce transport et donc directement dépendant du type de plante et de son stade de croissance.

Le transfert foliaire est très dépendant également du type de plante. La surface des feuilles détermine le facteur d'interception qui permet de calculer la quantité d'eau effectivement en contact avec celles-ci. Une partie de cette eau est retenue à la surface des feuilles. L'autre partie est utilisée par la plante. Les éléments contenus dans cette dernière migrent alors à l'intérieur de la plante vers les parties consommables. Ce dernier transfert de la feuille à la partie consommable de la plante est décrit par le facteur de translocation qui dépend de l'élément considéré et du stade de croissance de la plante.

Au final, les comportements dans les végétaux des radionucléides sont très variables en fonction de l'élément considéré et du type de culture envisagé, certaines plantes montrant des capacités de prélèvement et de bioconcentration plus fortes.

**10.6.2 Le transfert des radionucléides dans la biosphère actuelle pour les zones de plateaux du site de Meuse / Haute-Marne**

Sur les plateaux et plus particulièrement sur le plateau du Barrois, la nappe libre est située de quelques mètres à 10 / 15 mètres sous la surface du sol (Andra, 2003c). Le milieu présent au-dessus de cette nappe est constitué de Calcaires du Barrois, plus ou moins fracturés lorsque l'on se rapproche de la surface, et de 30 à 50 cm de sol (cf. § 3.5.4). Cet ensemble n'est que partiellement saturé (Figure 10.6.3). Dans cette zone non saturée, les mouvements de l'eau sont en général descendants : il y a infiltration des eaux de pluie vers la nappe lors des épisodes pluvieux importants. Ce phénomène de recharge est rapide (de quelques jours à quelques semaines), ainsi que l'illustrent les courbes de réponses des niveaux piézométriques (cf. § 3.3.2.3) (Andra, 2003c). Cette rapidité est un indicateur de forte perméabilité de la zone non saturée. Les fluctuations hautes eaux-basses eaux ne permettent pas la remontée de la nappe au niveau de la surface.

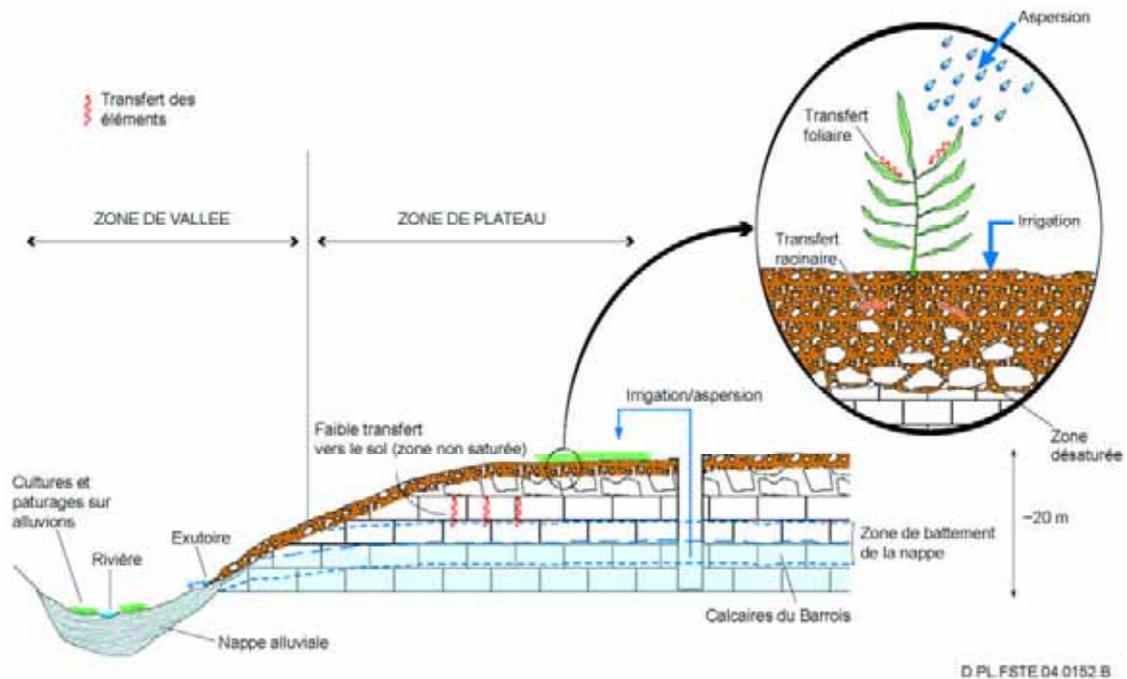


Figure 10.6.3 Modèle de transfert des radionucléides de la géosphère à la biosphère sur le site de Meuse / Haute-Marne

Seuls les quelques premiers décimètres de sol, tributaires des conditions de surface, montrent des variations significatives de teneur en eau (De Marsily, 1981). En dessous, dans toute la zone non saturée, il est admis qu'il y a continuité de la phase liquide, cette dernière existant essentiellement à l'interface des solides. Un transfert par diffusion des radionucléides est alors théoriquement possible au sein de cette phase liquide depuis l'eau de la nappe libre des Calcaires du Barrois jusqu'au sol, mais il est probablement faible dans ces conditions d'absence de saturation totale. De plus, cette zone non saturée est régulièrement soumise à des flux d'eaux descendants, créant un lessivage et entraînant les solutés vers le bas. Ainsi, les échanges naturels de solutés entre la surface de la nappe et les sols sont très faibles sur les zones de plateaux.

Un apport plus important de radionucléides aux sols des plateaux ne peut donc se concevoir que de manière artificielle, par la pratique de l'irrigation et de l'aspersion des zones cultivables par de l'eau provenant de l'exploitation d'une source ou d'un forage dans la nappe des Calcaires du Barrois (ou de l'Oxfordien carbonaté si ce dernier s'y prête) (Figure 10.6.3).

Dans ce cas, les caractéristiques des sols de plateaux, argileux (40 % environ) et contenant de l'ordre de 5 % de matière organique (Andra, 2005h, chapitre 22), conditionnent le comportement des radionucléides (Andra, 2003a).

- Dans les sols, une faible partie de l'iode est sorbée ( $K_d$  de  $10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ) mais l'essentiel reste retenu au niveau des racines. De plus, les plantes accumulent également cet élément par voie aérienne (eau d'aspersion).
- La concentration en chlore total (isotopes stables et chlore 36) provenant de l'eau de la nappe (de l'ordre de  $0,02 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) est diluée dans le sol par les apports d'eau météorique plus importants (d'un facteur 4 environ) mais très peu salés ( $0,005 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ). La concentration du chlore 36 est ainsi diluée d'un facteur 2 environ dans l'eau des sols. Ce chlore 36 migre ensuite dans les plantes essentiellement par voie racinaire.

- La forme la plus probable du sélénium dans les sols du site Meuse / Haute-Marne (sols aérés donc milieu oxydant, pH neutre à légèrement acide) est la forme sélénite. Les mesures de  $K_d$  effectuées sur un sol du site avec une solution de sélénite montrent des valeurs de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , comparables avec les données de sols analogues disponibles par ailleurs.
- Le bore est peu retenu dans les sols des plateaux ( $K_d$  dans le sol de  $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Comme le chlore, il est donc facilement disponible pour un transfert racinaire, selon les plantes (pommes de terre, céréales). Les fruits, notamment ceux riches en polyols (pommes, poires, prunes, cerises,...), ont tendance à montrer une accumulation du bore plus importante.

À partir des plantes, le transfert vers l'homme suit le schéma défini précédemment.

### 10.6.3 Le transfert des radionucléides dans la biosphère actuelle pour les zones de vallées

Les vallées représentent les zones de réception des exutoires naturels des nappes. Elles sont directement alimentées, à partir des sources, par de l'eau contenant des radionucléides, qui se retrouvent dans les eaux de rivières (Figure 10.6.3). À l'exutoire même, ou proche de ce dernier, les concentrations en éléments sont celles de la nappe de surface. Dès l'arrivée dans la plaine alluviale, il y a une forte dilution par les eaux des rivières. Les rivières des vallées montrent des débits très variables en fonction de la position dans le bassin versant et de la saison. Les débits moyens mesurés dans la vallée de l'Orge donnent des valeurs caractéristiques de débit de l'ordre de 50 à 100  $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$  en partie amont de Biencourt à 300  $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$  et plus en aval (hautes eaux d'été) (Andra, 2003c). Les débits mesurés aux sources alimentant ce ruisseau sont de quelques 10  $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$  pour la partie amont, à 70  $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$  pour la partie aval, à la même époque. On peut également comparer, en contexte karstique, le débit interannuel de l'Ornain au Nord du secteur (10  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  (Andra, 2005h, chapitre 14)) avec les débits caractéristiques de sources karstiques (plusieurs centaines de  $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Cette dilution des eaux des exutoires dans les cours d'eau des vallées apparaît donc approximativement de plusieurs ordres de grandeur.

Dans ces vallées, les sols sont fréquemment hydromorphes (soumis à un excès d'eau permanent ou temporaire), soit parce que les cours d'eau cheminent sur des marnes, soit que les nappes d'accompagnement des rivières inondent régulièrement ces vallées (cf. § 3.5.4). Contrairement aux zones de plateaux, il y a donc, de manière plus ou moins permanente, contact direct entre les solutés et les sols. Ces derniers montrent une épaisseur plus importante que sur les plateaux. Néanmoins, les caractéristiques générales des sols sont assez semblables : la teneur en argile est du même ordre de grandeur (30 à 40 %), la matière organique est plus présente dans les horizons superficiels (10 %) que sur les plateaux (Andra, 2005h, chapitre 22). Les comportements des radionucléides y sont donc pratiquement identiques de même que le transfert aux plantes. La dilution par l'eau de la rivière limite cependant fortement les quantités transportées, sauf si l'utilisation de cette eau se fait à proximité des exutoires (sur les versants), où les conditions se rapprochent de la situation décrite sur les plateaux dans le paragraphe précédent.

### 10.6.4 L'effet de l'évolution géodynamique sur le transfert des radionucléides

Au cours des cycles climatiques de 100 000 ans, les évolutions des biosphères modifient sensiblement les schémas de transfert tels qu'ils ont été établis à l'actuel (cf. § 9.4.2).

Le passage à une biosphère de type boréale, puis toundra, induit une restriction forte des cultures sur les plateaux. En effet, le gel, d'abord saisonnier puis permanent des premières dizaines de mètres du sol, interdit à terme le recours à la ressource en eau sur ces zones. Les fonds de vallées deviennent également inhospitaliers : les débits importants des rivières à la sortie des saisons froides rendent les lits caillouteux et, durant la période de maximum glaciaire, déstabilisent complètement les dépôts alluviaux. Seules quelques terrasses subsistent, notamment durant la période boréale, inondées périodiquement. Dans les zones argileuses, en tête de vallées et donc moins soumises à cette

déstabilisation, le refroidissement ralentit la pédogenèse et la teneur des sols en matière organique augmente. Dans les dépressions, des marécages et tourbières s'installent progressivement.

Sur les plateaux, la restriction des surfaces cultivées, puis leur absence lors des maximums glaciaires ne permet plus la contamination des sols. Les activités humaines se concentrent alors près des exutoires naturels. En bordure des vallées, dans les terrasses non encore démantelées, les sols s'appauvrissent et deviennent caillouteux. Dans ce domaine, le comportement des radionucléides montre les mêmes tendances que dans les vallées durant la période tempérée. Dans les dépressions marneuses, ce comportement est plus ou moins fortement modifié en fonction de l'élément considéré (Andra, 2003a) :

- l'enrichissement en matière organique des sols peut favoriser la sorption de l'iode ( $K_d$  passant à des valeurs de l'ordre de  $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ),
- le milieu, devenant plus réducteur, paraît favoriser la sorption du sélénium : des valeurs de quelques  $10^{-1} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  sont trouvées en contexte froid, sur des sols analogues à ceux des dépressions marneuses du site,
- la teneur en  $^{36}\text{Cl}$  en solution dans le sol augmente, le bilan hydrique négatif (diminution des précipitations d'un facteur supérieur à 2 (cf. § 9.3) limitant la dilution,
- le bore, déjà très mobile dans les sols en période tempérée, le reste. Dans le cas où l'argile est le paramètre clef de la sorption, il peut même le devenir un peu plus, en raison de la diminution de la teneur en argiles.

## 10.7 Synthèse sur le relâchement et le transfert des radionucléides

### 10.7.1 Les effets des évolutions thermique, hydraulique, chimique, mécanique et géomorphologique sur le relâchement et le transfert des radionucléides

Les évolutions thermique, hydraulique, géochimique et mécanique du stockage et de son environnement géologique définissent le cadre phénoménologique du relâchement des radionucléides par les colis de déchets, puis du transfert éventuel de ces radionucléides depuis le stockage jusqu'à la biosphère. La description de ces évolutions met ainsi en évidence les points majeurs suivants.

- Les charges thermiques des zones de stockage de déchets C et de combustibles usés ne concernent qu'une période courte, environ la dizaine de milliers d'années, avec des maxima atteints très tôt, entre quelques années et la centaine d'années.

Le transitoire thermique est donc quasiment achevé au moment du relâchement des radionucléides, et il n'a donc pas d'influence majeure sur leur relâchement et leur transfert.

- L'évolution hydraulique du stockage est marquée par une période d'état non saturé des alvéoles de déchets B et des galeries jusqu'à l'atteinte d'une saturation totale vers 200 000 ans. Pendant les quelques premiers milliers d'années, il peut exister, en champ très proche du stockage, des conditions favorisant le transport convectif. Elles ne concerneraient pas les combustibles usés compte tenu de l'étanchéité des conteneurs à 10 000 ans. À l'échelle du transfert sur 60 mètres de part et d'autre du stockage vers le toit et le mur de la couche du Callovo-Oxfordien, elles n'entraîneraient pas d'effet significatif sur le transfert des radionucléides relâchés par les colis de déchets C (les surconteneurs ont une durée d'étanchéité de 4 000 ans). Que cela soit pendant cette période ou après resaturation totale et atteinte d'un nouvel équilibre hydraulique, la diffusion est globalement le mode de transport dominant dans les alvéoles de stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien. Ceci est garanti par la stabilité mécanique des scellements et des bouchons d'alvéoles, ainsi que par une cicatrisation hydraulique significative de l'EDZ initiale autour des ouvrages, qui ne constitue donc pas une voie de transfert privilégiée par rapport à la couche du Callovo-Oxfordien.

Les radionucléides migrent donc préférentiellement par diffusion dans les alvéoles de stockage vers les argilites, puis dans les argilites du Callovo-Oxfordien vers l'Oxfordien carbonaté et le Dogger.

- Les processus chimiques sont essentiellement des processus d'interface. À l'échelle du million d'années, les composants du stockage à base d'argile gonflante comme les barrières ouvragées et les bouchons des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés, ou les scellements ne sont dégradés que très localement et conservent en grand leurs propriétés hydrauliques. La dégradation chimique des alvéoles de déchets B s'inscrit sur une échelle de temps de plusieurs centaines de milliers d'années, pendant laquelle les colis de stockage peuvent être considérés comme dans un environnement cimentaire quasi sain. Les extensions maximales pluridécimétriques à moins de deux mètres de la perturbation alcaline autour des galeries et des alvéoles de déchets B ou fer-argilites autour des alvéoles de déchets C et de combustibles usés, sont négligeables devant l'épaisseur pluridécimétrique de la couche du Callovo-Oxfordien. La charge thermique du stockage est insuffisante pour modifier de manière significative et irréversible l'équilibre chimique de la couche du Callovo-Oxfordien et donc indirectement sa perméabilité et ses propriétés de rétention.

Les radionucléides relâchés hors des alvéoles de stockage migrent donc dans un Callovo-Oxfordien proche de son état actuel.

- Les évolutions géomorphologiques induisent une modification significative des charges hydrauliques et des directions d'écoulements dans les encaissants sus-jacents du Callovo-Oxfordien, à partir de 300 000 à 500 000 ans jusqu'au million d'années et au-delà. En particulier, il y a création de nouveaux exutoires locaux pour l'Oxfordien carbonaté.

Le transfert des radionucléides qui migrent à travers tout le Callovo-Oxfordien pour atteindre les encaissants à partir de ces échelles de temps, est donc influencé par la modification des écoulements sous l'effet des évolutions géodynamiques.

### **10.7.2 Des radionucléides aux comportements spécifiques en terme de solubilité et de rétention**

Que cela soit en milieux argileux (couche du Callovo-Oxfordien, barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés, bouchon d'alvéole de déchets C et d'alvéole de combustibles usés, scellement d'alvéole de déchets B, de galerie et de puits, remblais de galerie) ou en milieu cimentaire (alvéoles de déchets B), les radionucléides se répartissent schématiquement en deux grandes familles vis-à-vis de leur capacité de migration sous forme dissoute.

- Les éléments dont la solubilité est élevée et la rétention faible ou nulle, comme par exemple l'iode ou le chlore. Ces éléments sont dits « mobiles ».
- Les autres éléments dont certains possèdent une solubilité et une rétention élevées, comme par exemple le césium ou bien une solubilité faible et une rétention forte, comme par exemple les actinides et les lanthanides.

### **10.7.3 Un relâchement lent et limité des radionucléides hors du stockage**

#### **10.7.3.1 La lente dégradation des conteneurages métalliques et des déchets**

- **La faible cinétique de corrosion des conteneurages métalliques des colis de déchets C et des colis de combustibles usés**

Les faibles vitesses de corrosion des aciers dans les conditions du stockage permettent de considérer en référence des durées d'étanchéité de l'ordre de 4 000 ans pour les surconteneurs de colis de déchets C et de l'ordre de 10 000 ans pour les conteneurs de combustibles usés. Une approche moins conservatrice amène à des durées d'étanchéités plus longues de 15 000 et 30 000 ans respectivement.

- **La lente dissolution aqueuse de la matrice vitreuse des déchets vitrifiés et des oxydes d'uranium ou uranium-plutonium des combustibles usés**

Les dissolutions de la matrice vitreuse et des pastilles d'oxydes des combustibles usés s'inscrivent respectivement sur des échelles de temps de l'ordre de 300 000 ans après la perte d'étanchéité des surconteneurs et de quelques dizaines de milliers d'années à la centaine de milliers d'années (dans le cas de la dissolution radiolytique) après la perte d'étanchéité des conteneurs.

- **Des comportements variés suivant les déchets B, mais une dégradation globalement lente**

Les déchets B recouvrent une variabilité de déchets (coques en zircaloy et embouts, déchets technologiques métalliques, sels, composés organiques,...) et de modes de conditionnement (bitumage, compactage, cimentation). Par conséquent, les cinétiques de dégradation des déchets

varient, mais elles s'inscrivent globalement sur une échelle de temps de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'années.

### 10.7.3.2 Les alvéoles de stockage : des environnements chimiques contribuant à une faible mobilité des radionucléides

- **Des environnements physico-chimiques stables pendant au moins plusieurs centaines de milliers d'années**

Sur le million d'années, la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés conserve globalement ses caractéristiques initiales, en équilibre avec les eaux des argilites. Elle n'est affectée qu'au contact des composants métalliques par interaction avec le fer. Pour les alvéoles de déchets C, les argilites ne sont elles aussi affectées qu'au contact même avec le chemisage.

La dégradation des bétons est un processus lent dans les conditions du stockage. Les alvéoles de déchets B conservent ainsi globalement des caractéristiques proches de celles de béton sain sur plusieurs centaines de milliers d'années. À cette date, (i) la dégradation des alvéoles par les eaux des argilites est limitée à la périphérie des alvéoles, avec une chimie des eaux de béton altéré ou de béton dégradé, et (ii) le cœur des alvéoles, au niveau des colis de stockage, présente les caractéristiques d'un environnement de béton sain.

- **Des environnements favorables à la faible solubilité et à la rétention des radionucléides**

De manière générale, les alvéoles de stockage constituent des environnements chimiques favorables à la faible solubilité et la sorption de la majorité des radionucléides. Avec les faibles écoulements d'eau et le caractère dominant de la diffusion au sein du stockage, ces environnements concourent à un faible et lent relâchement des radionucléides hors des alvéoles. Ainsi, les principaux radionucléides qui migrent hors des alvéoles de déchets B sont  $^{129}\text{I}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{99}\text{Tc}$  et  $^{79}\text{Se}$ . Pour les alvéoles de déchets C et les alvéoles de combustibles usés, il s'agit de  $^{129}\text{I}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  et  $^{14}\text{C}$ . Les actinides et les lanthanides restent confinés au sein des alvéoles et en champ proche du stockage, sur le million d'années.

### 10.7.4 Une migration des radionucléides à vie longue très solubles et non sorbés dans la couche du Callovo-Oxfordien

La couche du Callovo-Oxfordien présente des caractéristiques de rétention et de diffusion des radionucléides favorables à la lente migration des radionucléides. Associées à la forte épaisseur de la couche, ces caractéristiques concourent à ce que seuls les radionucléides à vie longue très solubles et non sorbés relâchés hors du stockage atteignent les encaissants sus-jacents et sous-jacents, avec des temps des maxima de débit molaire de l'ordre de quelques centaines de milliers d'années. Il s'agit de  $^{129}\text{I}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ , et dans une moindre mesure  $^{79}\text{Se}$  et  $^{14}\text{C}$ . Sur le million d'années, la migration des autres radionucléides, notamment les actinides, reste circonscrite à la couche du Callovo-Oxfordien, et plus particulièrement sur quelques mètres autour du stockage.

### 10.7.5 Un transfert des radionucléides dans les encaissants influencé par les évolutions géodynamiques

Le transfert de l'iode et du chlore dans le Dogger et l'Oxfordien carbonaté s'effectue majoritairement par convection - dispersion.

Dans le Dogger, le panache d'iode et de chlore progresse horizontalement vers l'Ouest-Sud-Ouest. La vitesse de convection est très faible et l'extension du panache est d'ordre plurikilométrique après un million d'années. Dans les encaissants supérieurs, l'atteinte des maxima de débits molaires est antérieur à l'effet de l'évolution des écoulements dans ces encaissants sous l'effet des évolutions

géodynamiques. L'essentiel de l'iode et du chlore suit donc dans un premier temps des directions d'écoulement comparables à l'actuel.

Au-delà de 300 000 ans, l'érosion de surface modifie progressivement les directions principales d'écoulement en aval du laboratoire de recherche souterrain. L'exutoire de la vallée de la Marne est conservé. Les trajectoires régionales disparaissent au profit d'un second exutoire local au Nord-Est du site dans la vallée de l'Ornain et, à l'horizon du million d'années d'un exutoire dans le cours supérieur de la Vallée de la Saulx.

Quelle que soit la trajectoire, l'iode et le chlore subissent une forte dilution durant leur transfert jusqu'à la surface.

#### **10.7.6 Le transfert des radionucléides dans la biosphère et vers l'homme**

Le transfert des radionucléides dans la biosphère est conditionné par les environnements de surface. Les exutoires des nappes superficielles (Calcaires du Barrois) et profondes (Oxfordien carbonaté), situés dans les vallées, sont les endroits privilégiés à partir desquels les radionucléides peuvent être transférés dans les sols et les plantes, puis vers les animaux et les communautés humaines. Les concentrations pouvant être impliquées sont d'environ un ordre de grandeur plus faibles dans les vallées que près des exutoires, du fait de la dilution par l'eau des rivières. Sur les plateaux, ce transfert n'est possible, à l'actuel, que d'une manière artificielle, à l'occasion d'une exploitation par forage des nappes pour les besoins humains, et notamment l'irrigation/aspersion des cultures.

Les caractéristiques des sols à l'actuel, argileux et montrant une teneur en matière organique de 5 à 10 %, sont proches quel que soit le domaine morphologique considéré (plateau, vallées). Ces sols permettent une sorption de certains éléments : sélénium et iode, et dans une moindre mesure bore. Le chlore, non retenu, reste en solution. Le transfert des radionucléides se fait ensuite par les plantes jusqu'aux animaux et à l'homme.

Les évolutions vers des biosphères plus froides (d'abord boréales puis toundra) vont limiter puis interdire les cultures sur les zones de plateaux, les ressources en eaux devenant moins accessibles du fait du gel saisonnier puis permanent en profondeur. Les apports des radionucléides à la biosphère se limitent alors à certaines zones de vallées et de dépressions marneuses.

#### **10.7.7 Les éléments phénoménologiques importants pour la réversibilité**

L'évaluation de la réversibilité est menée par rapport aux états des composants du stockage. On rappellera dans un premier temps les principaux résultats vis-à-vis de la réversibilité, puis on traitera l'analyse des conséquences potentielles d'une exploitation pluriséculaire.

##### **10.7.7.1 L'état du stockage à l'issue de la période séculaire conventionnelle de référence d'exploitation du stockage**

À l'issue de la période séculaire d'exploitation (au moment de la fermeture), les processus chimiques sont encore limités. C'est le cas au sein des alvéoles de stockage des déchets C et des alvéoles de stockage des combustibles usés : elles sont proches de la saturation totale, mais les vitesses de corrosion sont faibles (quelques micromètres par an au maximum) de sorte que les épaisseurs de corrosion sont de quelques millimètres. Ainsi, plus particulièrement, la faible corrosion des chemisages pendant cette période conduit au maintien de leur résistance mécanique et donc à leur étanchéité de sorte que les colis sont dans un environnement « sec » et ne sont pas affectés par une corrosion significative. L'état non saturé (« sec ») des alvéoles de déchets B et des galeries concourt à la forte limitation des processus de dégradation des bétons et de corrosion des composants métalliques et corrélativement à celle des processus mécaniques (fluage des argilites). Ainsi, il n'y a pas de relâchement de radionucléides en solution.

#### **10.7.7.2 Influence d'une période d'exploitation pluriséculaire sur la réversibilité**

Le maintien de la ventilation sur une période pluriséculaire (et donc d'un environnement « sec ») dans les alvéoles de déchets B n'aurait pas d'influence sur l'évolution chimique des colis de déchets. Il n'y aurait pas de relâchement de radionucléides en solution. Si les alvéoles de stockage de déchets B étaient fermées comme dans le chronogramme d'exploitation conventionnel de référence mais que le stockage restait ouvert sur une durée pluriséculaire, l'état hydraulique des alvéoles évoluerait peu durant cette période pluriséculaire. Cette évolution serait insuffisante pour entraîner une dégradation des déchets et un relâchement de radionucléides en solution.

Pour les alvéoles de déchets C et de combustibles usés, la prolongation de l'exploitation du stockage sur une durée pluriséculaire ne conduirait pas à modifier de façon significative l'évolution des différents processus chimiques se déroulant au cours de cette période. En particulier, les vitesses de corrosion resteraient faibles et n'auraient pas de conséquence sur la tenue mécanique des composants métalliques (soutènement et chemisage). L'étanchéité du chemisage serait maintenue et avec elle l'absence de corrosion des colis de stockage, donc la préservation de leur intégrité physique et l'absence de relâchement de radionucléides.

# 11

## **Incertitudes sur la description phénoménologique**

---

<b>11.1</b>	<b>Incertitude sur le mode d'exploitation et de fermeture du stockage.....</b>	<b>487</b>
<b>11.2</b>	<b>Examen des incertitudes sur les données disponibles et les interprétations phénoménologiques.....</b>	<b>488</b>
<b>11.3</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>494</b>



Les précédents chapitres ont exposé l'histoire du stockage et des phénomènes qui s'y déroulent. Ils ont ainsi offert un support à la compréhension de l'évolution des divers composants dans le temps. Ce travail se fonde sur l'ensemble des connaissances aujourd'hui disponibles, qu'elles aient été acquises directement sur les argilites du Callovo-Oxfordien *in situ*, sur échantillons, à partir de modélisations, au laboratoire du Mont Terri en Suisse ou par transposition de résultats obtenus dans le cadre de programmes étrangers. Il utilise également les travaux réalisés sur les matériaux constitutifs des ouvrages du stockage et des déchets ainsi que sur leurs évolutions au cours du temps. Compte tenu de la complexité du système et des échelles de temps considérées, il n'est pas possible de disposer d'une vision définitive de l'évolution et de ses paramètres détaillés. En revanche, l'évolution d'ensemble du stockage obéit à un schéma robuste aux incertitudes, d'autant qu'il a été dessiné avec prudence et avec les nuances nécessaires pour préciser les marges de variation possibles. De ce point de vue, la vision présentée constitue le support privilégié de l'analyse de sûreté. En effet, cette dernière peut ensuite extraire une représentation simplifiée, plus schématique et prudente, introduisant des degrés de conservatisme supplémentaires, s'éloignant certes du réalisme, mais garantissant que son approche est marquée par la prudence, voire le pessimisme.

En guise de transition avec l'approche de sûreté, on propose dans le cadre de ce tome une première vision des incertitudes qui peuvent affecter le récit ici présenté de l'histoire du stockage. Ces éléments ont été présentés de manière parcellaire au fil de l'exposé. Il s'agit donc avant tout d'en proposer une approche de synthèse plutôt que d'apporter des éléments réellement nouveaux.

### **11.1 Incertitude sur le mode d'exploitation et de fermeture du stockage**

Les chapitres précédents ont proposé une vision de l'évolution du stockage après fermeture de ce dernier, c'est-à-dire après scellement des puits d'accès. Il s'agissait en effet d'examiner comment se comporterait le stockage si l'on souhaitait tirer parti de sa fonction de sûreté passive, sans intervention de l'homme. Pour réaliser une telle analyse, il convient de définir une convention sur les échelles de temps considérées. Aussi, afin de disposer d'un point de départ, on a adopté un chronogramme conventionnel de référence qui considère une exploitation du stockage sur une centaine d'années, puis une fermeture de ce dernier au-delà.

La question se pose donc de savoir comment ce choix influe de manière plus ou moins importante sur l'histoire du stockage telle qu'elle a été présentée dans ce tome. Chaque chapitre relatif à une catégorie particulière de phénomènes s'est efforcé de prendre en compte ce paramètre. Il ressort des analyses que le schéma présenté est peu sensible à la date de fermeture du stockage dès lors que cette dernière varie sur une période pluriséculaire, typiquement d'un à plusieurs siècles. En effet, pour un tel intervalle temporel, la situation des installations en début de phase de post-fermeture varierait peu, l'évolution ultérieure s'inscrirait globalement dans le schéma présenté. On peut même noter que, pour certains aspects (thermique, gaz), l'impact d'un prolongement de la période d'exploitation serait plutôt favorable et conforterait la vision d'ensemble. En tout état de cause, aucune conséquence susceptible de remettre en cause le principe de réversibilité n'a été décelée. On rappellera parallèlement que cette durée pluriséculaire est également celle qui ressort des évaluations liées à l'ingénierie et à la phénoménologie. Pour une telle durée, la réversibilité peut être garantie sans autre intervention que les actions classiques de surveillance et de maintenance. Au-delà, il serait nécessaire d'entreprendre des travaux complémentaires qui iraient très probablement d'un renforcement des actions préventives, à une éventuelle reprise systématique des colis pour un réaménagement des ouvrages. On peut néanmoins penser que les grandes lignes du schéma présenté demeurerait néanmoins valides à quelques adaptations près. Au total, le choix d'un chronogramme conventionnel d'exploitation n'a que peu d'influence sur l'évolution générale du stockage telle qu'elle est décrite dans ce tome.

## 11.2 Examen des incertitudes sur les données disponibles et les interprétations phénoménologiques

L'identification des incertitudes sur l'évolution du stockage est particulièrement liée à l'analyse de sûreté. Cette dernière vise en effet un recensement et la définition d'options pour prendre en compte les éléments identifiés. C'est tout particulièrement l'objet de l'Analyse Qualitative de Sûreté (Andra, 2005c), dont une synthèse est proposée dans le tome sur l'évaluation de sûreté du stockage géologique (Andra, 2005j). *In fine*, ce travail débouche sur la définition de scénarios de sûreté qui constituent des supports pour appréhender l'ensemble des incertitudes et les traiter dans un cadre global et cohérent. Le lecteur trouvera donc dans ces documents le cadre de l'approche de sûreté, les fonctions de sûreté ainsi que les options retenues pour faciliter la maîtrise des incertitudes.

Par conséquent, il ne s'agit pas ici de dresser un catalogue des incertitudes, mais de rappeler les déterminants de l'évolution phénoménologique et leurs sensibilités aux connaissances aujourd'hui disponibles. Cet exercice constitue un appui à l'analyse de sûreté dans la mesure où il propose des éléments qualitatifs et quantitatifs pour appréhender les différents éléments que cette dernière traite de manière exhaustive. En ce sens, il constitue un complément au récit qui a été fait dans les chapitres précédents de l'évolution du stockage, dans l'optique de créer un lien avec l'analyse détaillée des incertitudes présentée dans le tome sur l'évaluation de sûreté du stockage géologique (Andra, 2005j).

On traitera dans un premier temps la couche du Callovo-Oxfordien dont les caractéristiques conditionnent fortement l'évolution du stockage et, *in fine*, le relâchement et le transfert des radionucléides. Puis on traitera de l'évolution phénoménologique du stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche et enfin des encaissants.

### 11.2.1 Les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien

La synthèse sur les déterminants majeurs de l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique a souligné l'importance des caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien en grand sur l'évolution du stockage et *in fine* sur le transfert des radionucléides relâchés vers les encaissants. Il s'agit en particulier de la faible perméabilité (et de manière plus générale des faibles circulations d'eau), du transfert dominant des solutés par diffusion, des propriétés de rétention élevées, et des faibles rapports eau/roche mis en jeu. L'ensemble de ces propriétés contribue non seulement à la lente évolution chimique du stockage, mais aussi aux faibles extensions des perturbations apportées par le stockage sur la couche du Callovo-Oxfordien. Celle-ci possède donc en elle-même des caractéristiques qui assurent sa stabilité sur l'échelle de temps du million d'années, et permettent *in fine* des relâchements très progressifs des radionucléides par les colis de déchets puis leur faible migration vers les encaissants. On discutera dans cette section des principaux éléments contribuant à ces propriétés d'ensemble en précisant le degré de confiance atteint dans leur connaissance et leur maîtrise.

#### 11.2.1.1 La perméabilité en grand

La caractérisation de la perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien s'appuie sur un nombre important de travaux menés sur échantillons ou en forage, à petite échelle (pluridécimétrique) comme à grande échelle (plurimétrique). La géophysique permet de corréliser au mieux ces données. Appuyé par l'existence d'une surpression, l'ensemble concourt à conforter l'image d'une faible perméabilité en grand de la couche avec, en particulier, l'absence de fractures hydrauliquement actives et une anisotropie de perméabilité inférieure à un ordre de grandeur. Cela permet de définir avec une confiance raisonnable les valeurs de perméabilité à prendre en considération.

Ces données ont été établies à l'échelle du laboratoire et corroborées sur un assez large éventail d'études. Les différents indices aujourd'hui réunis permettent d'avoir une bonne confiance en ces

évaluations. En particulier, on n'attend pas de contrastes très forts dans les données de perméabilité sur la zone de transposition. En effet, de fortes perméabilités de la couche du Callovo-Oxfordien en grand sont très improbables et ne seraient pas cohérentes par exemple avec les profils de concentration en chlorures. Une variation d'un ordre de grandeur par rapport à la référence actuelle est envisageable. Il va de soi que, dans le cadre d'une poursuite des recherches, des investigations complémentaires sur la zone de transposition permettraient d'affiner ces conclusions.

La perméabilité en grand du Callovo-Oxfordien apparaît comme bien connue avec un degré de confiance satisfaisant. Les variations autour des valeurs disponibles devraient se situer autour d'un ordre de grandeur.

#### **11.2.1.2 Les propriétés de diffusion et de rétention**

La diffusion et les capacités de rétention de la couche du Callovo-Oxfordien ont fait l'objet de nombreux travaux de caractérisation sur toute l'épaisseur de la couche, sur la base d'échantillons prélevés en forage. Les études géologiques (notamment minéralogiques) et géophysiques permettent de corréliser les résultats de ces travaux à l'échelle de la zone de transposition. Comme pour la perméabilité, l'ensemble conduit à l'image d'une couche ayant des propriétés de faible diffusion et des capacités de rétention élevées et ce, de manière similaire sur toute son épaisseur et à l'échelle de la zone de transposition. Des variations du coefficient de diffusion des solutés (anions et cations) et des  $K_d$  existent, mais elles restent dans un domaine limité (moins d'un ordre de grandeur). En outre, les résultats des mesures en température soulignent que les effets de la température ( $T < 80\text{ °C}$ ) sont faibles et inclus dans le domaine de variation des données expérimentales à température ambiante (proche de la température géothermale) pour la plupart des éléments. Ce domaine de variation n'apparaît pas susceptible d'affecter les grandes caractéristiques du transport dans la couche du Callovo-Oxfordien. Enfin, comme pour la perméabilité, les données actuelles ne couvrent pas de manière exhaustive la zone de transposition et bénéficieraient d'une poursuite du programme visant à affiner les conclusions en se fondant sur des expérimentations à plusieurs échelles. En tout état de cause, les données disponibles et celles en cours d'acquisition dressent déjà un tableau qui apporte une confiance raisonnable.

On notera que la porosité accessible à la convection des solutés n'a pas fait l'objet de mesure directe. Sa valeur commune aux anions et cations résulte d'un raisonnement basé sur l'électroneutralité : elle est prise par convention égale à la porosité cinématique. Bien que les incertitudes sur la valeur de la porosité convective n'aient pas d'effet sur la représentation du transfert des solutés, sa valeur pourra être confortée permettant de disposer ainsi d'un degré de confiance supplémentaire.

La gamme de variation des propriétés de diffusion et de rétention a été caractérisée sur de nombreux échantillons. Compte tenu des données actuelles, elle ne devrait en aucun cas excéder un ordre de grandeur.

### **11.2.2 Le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche**

On discutera dans cette section trois aspects importants pour la représentation phénoménologique de l'évolution du stockage et de la couche d'argilites en champ proche :

- le rôle des gaz et l'évolution hydraulique,
- les caractéristiques et les propriétés de la zone endommagée,
- les modèles de relâchement des déchets de haute activité et des combustibles usés.

#### **11.2.2.1 Production de gaz et transitoire hydraulique**

La désaturation puis la resaturation du stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche constituent un processus majeur dans l'évolution phénoménologique. En effet, c'est la présence

d'eau qui constitue le vecteur principal d'évolution du stockage, que ce soit par dégradation des composants, initiation des processus chimiques ou transport de radionucléides. Il est donc important de bien en appréhender les mécanismes et les constantes de temps. La présente section discute des incertitudes sur les principaux ordres de grandeur et phénomènes.

L'interprétation générale est rendue sensiblement plus complexe du fait de la présence d'hydrogène. En effet, lors du processus de resaturation du stockage s'initie la corrosion des composants métalliques. Cette dernière produit de l'hydrogène qui est alors susceptible de perturber ou de freiner le processus de resaturation.

#### *Cinétiques de corrosion et impact de l'hydrogène*

La présentation de l'évolution hydraulique du stockage sous l'effet de l'hydrogène de corrosion des composants métalliques est issue d'évaluations obtenues en considérant une vitesse de corrosion des aciers non alliés de l'ordre de 2 à 3  $\mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ , et en ne prenant pas en compte l'effet potentiel du degré de saturation de l'environnement des composants métalliques sur la vitesse de corrosion ainsi que la consommation d'eau par la corrosion.

Les évaluations actuellement disponibles (expérimentation et modélisation) tendent à indiquer que les vitesses de corrosion pourraient être significativement plus faibles et se situer entre 0,1 et 1  $\mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ . S'il est raisonnable de considérer que le degré de saturation dans les alvéoles de déchets C et de combustibles usés sera rapidement supérieur à 97 % dans les argilites en champ proche et dans l'argile gonflante (cas des combustibles usés), il apparaît en revanche que des taux de saturation très faibles pourraient être maintenus sur de longues périodes dans les alvéoles de déchets B compte tenu des caractéristiques hydriques des bétons et des jeux résiduels.

La prise en compte de vitesses de corrosion plus faibles et des couplages évoqués ci-dessus conduit à envisager des pressions d'hydrogène beaucoup plus faibles que celles retenues dans la description présentée dans ce document. Elles pourraient ne jamais dépasser la pression hydrostatique dans le Callovo-Oxfordien (5 MPa), et ainsi ne générer aucune surpression hydraulique en champ proche. Des cinétiques de corrosion inférieures d'un facteur quatre à celles retenues conduiraient à diminuer les flux de production d'hydrogène d'un même facteur et à étaler la production sur des périodes plus importantes (plusieurs dizaines de milliers d'années à plusieurs centaines de milliers d'années). Dès lors, l'absence d'écoulement biphasique significatif et la prédominance des processus de dissolution-diffusion dans la migration de l'hydrogène, sont envisageables. Il en résulterait une évacuation progressive de l'hydrogène et un schéma général plus simple du processus de resaturation. Cela signifierait en particulier qu'un degré de saturation plus élevé pourrait être atteint plus tôt que les cent à deux cents mille ans retenus en hypothèse de référence dans l'analyse.

Par ailleurs, dans de telles conditions de corrosion, les durées d'étanchéité des (sur)conteneurs de déchets C et de combustibles usés seraient largement accrues par rapport aux estimations utilisées actuellement en lien avec le dimensionnement.

#### *Mécanismes d'évacuation de l'hydrogène*

Ceci posé, dans le cadre des évaluations actuelles, il existe une quantité totale importante d'hydrogène produit dans un temps relativement court. L'hydrogène tendra donc, dans cette configuration, à migrer par des voies de transport préférentielles (zone endommagée, galeries...) qui apparaissent au niveau des alvéoles plus aisées que le milieu géologique lui-même.

Il existe des incertitudes sur les propriétés de transfert des différentes voies et leur part respective dans la circulation de l'hydrogène. Les travaux de modélisation réalisés à ce jour sont encore limités dans les représentations de l'espace et des couplages entre la corrosion et l'hydraulique (prise en compte de lois de couplage simples entre le degré de saturation et les vitesses de corrosion).

On a considéré à ce stade que l'évacuation de l'hydrogène par la zone endommagée autour des ouvrages ou par les galeries puis par le Callovo-Oxfordien constituait une voie préférentielle. Cette

option apparaît comme raisonnable et reflétant bien l'état actuel des connaissances. La caractérisation des mécanismes de transport dans la roche mériterait encore d'être affinée pour disposer d'une représentation physique plus détaillée. En revanche, les données retenues à ce stade sont conformes aux observations expérimentales en forage qui montrent la possibilité d'une circulation du gaz dans la roche et une restauration des propriétés hydrauliques de la roche après passage de ce dernier. Les évaluations menées sur les quantités de gaz produites et les pressions atteintes viennent conforter la plausibilité de ce mécanisme. On a par ailleurs négligé divers facteurs favorables à une régulation dans la durée des circulations de gaz. Ainsi, la géométrie tridimensionnelle du stockage, en particulier l'ensemble des volumes et des surfaces d'échange avec le Callovo-Oxfordien, n'a été que partiellement représentée. Les moyens de modélisation actuellement disponibles sont capables de rendre compte des processus de transfert des gaz par dissolution - diffusion et par écoulement biphasique mais ne sont pas encore en mesure de représenter ensemble les différents couplages indiqués ci-dessus, *a fortiori* pour la géométrie réelle du stockage et sur les grandes échelles de temps mises en jeu. Au total, on peut estimer que la représentation adoptée est prudente.

#### *Lien avec la démarche de sûreté*

Des incertitudes existent sur le processus de resaturation du stockage. Il conviendrait en effet de conduire des modélisations couplées d'une relative complexité pour affiner la vision aujourd'hui disponible. Il est en revanche possible de noter que le schéma présenté dans ce tome, avec une resaturation étagée sur deux cent mille ans, est enveloppe par rapport aux évolutions envisageables. Compte tenu des cinétiques pénalisantes retenues pour la production d'hydrogène, on dispose d'une vision majorante des durées de resaturation possibles. On a également ce faisant traité le cas le plus complexe et mis en évidence qu'il ne soulevait pas de difficultés majeures. En particulier, l'hydrogène n'apparaît pas susceptible d'induire de dommages spécifiques, ni de perturber le transport des radionucléides. Ainsi, la réduction des incertitudes tendra à apporter une vision plus simple, mais aussi moins pénalisante du processus de resaturation. En conséquence, la prise en compte des incertitudes par le calcul de sûreté pourra se fonder sur une approche simplifiée qui considère, en première analyse, une resaturation immédiate du stockage. Cette dernière revient à mettre l'ensemble des composants en présence d'eau dès l'instant initial alors que l'analyse présentée souligne que l'arrivée d'eau s'effectuera très progressivement et avec une resaturation complète qui sera, en toutes hypothèses, tardive. Dans un tel cadre, on néglige la limitation des processus chimiques qu'engendrera nécessairement une quantité réduite d'eau mobilisable dans les ouvrages.

#### **11.2.2.2 Propriétés hydrauliques de la zone endommagée autour du stockage dans le temps**

L'endommagement mécanique des argilites autour des ouvrages du stockage constitue un processus important dans la mesure où il modifie les propriétés hydrauliques en champ proche du stockage. En condition saturée et à l'équilibre hydraulique, la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien en grand et la conception des scellements à base d'argile gonflante minimisent l'influence de la zone endommagée sur les écoulements et le transport des solutés dans et autour du stockage. En revanche, les propriétés hydrauliques de l'EDZ jouent un rôle important dans les processus hydrauliques transitoires, en particulier pour le transfert des gaz.

L'évaluation de l'extension et des caractéristiques hydrauliques de la zone endommagée initiale autour des ouvrages du stockage repose principalement sur des essais sur échantillons, des analogies avec des formations argileuses profondes (argiles à Opalinus au Mont Terri et à Benken en Suisse) et des modélisations.

Par ailleurs, ces mêmes données conduisent à envisager comme très probable une cicatrisation hydraulique de l'EDZ dans le temps. Cette conclusion s'appuie aussi sur la présence de smectites dont le potentiel de gonflement devrait contribuer à la capacité d'auto-cicatrisation. Ces données semblent actuellement les plus plausibles, mais elles sont à conforter par des observations complémentaires dans la couche du Callovo-Oxfordien, en particulier pour l'évaluation des propriétés hydrauliques des argilites en champ proche des saignées des scellements.

En tout état de cause, on dispose d'une vision de la zone endommagée, de ses propriétés ainsi que de l'ordre de grandeur de leurs variations. Ces données peuvent être utilisées directement par l'analyse de sûreté. Celle-ci sera rendue d'autant plus prudente qu'on néglige dans l'histoire du stockage les effets pouvant conduire à résorber la zone endommagée (cicatrisation).

### **11.2.2.3 La dissolution de la matrice verre et des pastilles de combustibles usés**

Les mécanismes détaillés de dissolution des déchets vitrifiés et des oxydes des assemblages de combustibles usés font encore l'objet de discussions au plan international. Dans tous les cas, il s'agit de processus lents s'échelonnant sur quelques dizaines à centaines de milliers d'années.

Pour ce qui concerne les déchets vitrifiés, on dispose d'une gamme de modèles plus ou moins conservatifs qui couvrent les différentes situations envisageables. Des perspectives sont offertes quant à la prise en compte de vitesses de dissolution du verre plus faibles. L'analyse de sûreté peut donc se fonder avec un degré de confiance élevé sur les données actuelles en testant les différentes configurations et leur impact.

Pour les combustibles usés, la représentation adoptée repose sur une hypothèse de dissolution radiolytique de la matrice. Il est clair que cette option est très pénalisante et n'est pas convergente avec les options retenues au plan international qui apparaissent moins pénalisantes. En effet, la prise en compte d'un modèle de dissolution classique conduirait à des durées de relâchement nettement supérieures. Toutefois, la caractérisation du comportement des combustibles usés apparaît encore comme un sujet complexe. Il conviendrait de plus de distinguer entre les divers combustibles (UOX, MOX). Les incertitudes actuelles ont conduit à retenir une approche prudente, mais des marges de progrès existent très certainement dans ce cas spécifique.

Ainsi, les données disponibles offrent une base solide pour la sûreté avec l'identification des marges de sécurité et des pistes de progrès pour la représentation du terme source (que ce soit en termes d'hypothèses moins pénalisantes ou de contraintes plus fortes).

### **11.2.3 Les formations encaissantes**

Les formations encaissantes ne constituent pas des composants du système de stockage. Elles doivent néanmoins être représentées pour l'évaluation de l'impact du stockage. Cela suppose une connaissance du comportement des radionucléides relâchés qui parviennent en leur sein.

#### **11.2.3.1 Etat initial et évolution**

La description de l'évolution normale du stockage et de son environnement géologique sur le prochain million d'années souligne les modifications attendues des écoulements dans les formations encaissantes de la couche du Callovo-Oxfordien, en particulier celles sus-jacentes. Ces modifications résultent des changements climatiques associés à la géodynamique interne. Elles concernent pour l'essentiel les directions d'écoulement. Les vitesses d'écoulement devraient pour leur part rester du même ordre de grandeur. L'analyse de ces modifications repose sur la caractérisation des écoulements actuels et sur les scénarios d'évolutions climatiques.

Aucun scénario d'évolution climatique ne peut être défini comme le plus probable. Il existe une gamme de scénarios plausibles. En revanche, quel que soit le scénario plausible retenu, les tendances en matière d'évolution des écoulements sont similaires, en particulier en terme d'apparition d'exutoires locaux. De même, on dispose d'une évaluation raisonnable des ordres de grandeur pour la période à partir de laquelle les modifications deviennent significatives. Celle-ci est de quelques centaines de milliers d'années.

La représentation des écoulements actuels repose principalement sur des mesures hydrauliques en forages, la caractérisation géologique à l'échelle régionale et à l'échelle du secteur, ainsi que sur la modélisation. On dispose ainsi d'une grande confiance dans les directions générales (*i.e.* régionales) d'écoulement et dans les ordres de grandeur des vitesses d'écoulement, bien que des éléments de datation complémentaires puissent être utiles pour quantifier plus précisément ces vitesses. En revanche, des incertitudes apparaissent dans la représentation des détails :

- l'image d'horizons poreux non connectés dans le Dogger semble acquise, mais leur organisation à l'échelle du site et à l'échelle du secteur comporte encore des incertitudes ;
- on représente aujourd'hui, hors de la zone de transposition, une zone de fracturation diffuse s'exprimant dans l'Oxfordien carbonaté à partir de la Saulx, en direction des failles de la Marne. Cette représentation repose sur les données d'un seul forage, complétées par l'interprétation de structures tectoniques de surface. Elle est cohérente avec les variations de salinité observées pour les eaux des formations encaissantes du Callovo-Oxfordien. Elle ne modifie pas la représentation générale des écoulements tant à l'actuel que sur le prochain million d'années. Cette zone pourrait donc être mieux caractérisée, bien que cela n'induisse pas de modification sur la vision d'ensemble. Il appartient aux évaluations de sûreté de traiter ce point de manière aussi conservatrice que possible. La caractérisation disponible permet d'adopter des représentations pessimistes qui s'affranchissent très largement de cette incertitude.

En conclusion, les données disponibles permettent de bâtir un modèle de représentation prudent des écoulements dans les encaissants. Des caractérisations complémentaires affineraient cette image.

#### **11.2.3.2 Les caractéristiques de diffusion et de rétention de la base de l'Oxfordien carbonaté et du Kimméridgien marneux**

L'Oxfordien carbonaté présente à sa base un ensemble peu perméable de 60 mètres d'épaisseur environ (correspondant aux faciès C3a-C3b). Sa perméabilité et ses propriétés de diffusion et de rétention ne sont caractérisées aujourd'hui que sur quelques échantillons et pas à l'échelle de la zone de transposition. Cet ensemble, notamment l'horizon C3a présente probablement des caractéristiques proches de la couche du Callovo-Oxfordien. On ne peut toutefois préjuger aujourd'hui de leur homogénéité sur toute la zone de transposition. La prise en compte de propriétés de faible diffusion et de rétention élevées, exclue dans la représentation actuelle de l'évolution normale du stockage, modifierait l'image du transfert des radionucléides mobiles à vie longue comme  $^{129}\text{I}$  ou  $^{36}\text{Cl}$  dans le sens d'une augmentation des temps de transfert jusqu'aux niveaux poreux de l'Oxfordien carbonaté.

De manière similaire, le Kimméridgien présente des horizons marneux, non caractérisés notamment à l'échelle de zone de transposition, et qui pourraient présenter des propriétés de faible diffusion et de rétention élevée conduisant, là encore, à retarder et à diluer plus encore le retour des radionucléides mobiles vers la biosphère. En l'absence de caractérisation, ces propriétés n'ont pas été prises en compte dans la description de l'évolution phénoménologique du stockage.

#### **11.2.4 La représentation des couplages**

La description de l'évolution du stockage et de son environnement géologique a été menée selon un découpage en fonction des principaux phénomènes (thermique, hydraulique, chimique et mécanique – THCM). Le récit fait apparaître un ensemble de couplages dans le temps et dans l'espace. Leur représentation est en grande partie fondée sur des résultats d'analyses qualitatives. Celles-ci s'appuient sur un ensemble de simulations traitant les processus de manière découplée, mais recourant à des couplages simplifiés ou non continus, en tant que de besoin. Ceci résulte de la capacité actuelle des outils de simulation. En contrepartie, cela oblige à une grande prudence lors de l'analyse qualitative pour rendre compte des couplages.

Quelques points mériteraient d'être approfondis :

- l'évolution mécanique des ouvrages du stockage liée à l'évolution chimique ;
- la possibilité d'une représentation moins pénalisante des transferts gazeux prenant en compte les limitations du processus liées aux interactions entre phénomènes ;
- l'évolution des écoulements couplée aux évolutions géodynamiques et, corrélativement, la représentation en continu du transfert des radionucléides dans les encaissements sus-jacents.

Ces éléments conduiraient à disposer d'une vision plus fine de l'évolution, mais ne semblent pas de nature à remettre en cause le cadre conceptuel et la vision de l'histoire du stockage présentée dans ce tome. En effet, on peut considérer que les effets des couplages ont été identifiés pour ce qui relevait d'un impact au premier ordre.

### **11.3 Conclusion**

L'examen des incertitudes présenté dans ce chapitre permet de conforter l'image globale de l'évolution du stockage. On dispose en effet d'une confiance raisonnable sur les principaux paramètres et sur les mécanismes susceptibles de peser sur l'évolution du stockage. Il va de soi que des investigations complémentaires affinaient cette vision et permettraient probablement de fournir des descriptions plus précises, avec un degré de confiance encore supérieure, mais surtout de recourir à des hypothèses moins pessimistes dans le cadre des approches de sûreté. Au stade actuel, une fois les incertitudes prises en compte, il est possible d'apporter à la démarche de sûreté une vision suffisamment claire et probante du comportement du stockage pour qu'il soit procédé à des évaluations prudentes et pénalisantes. En particulier, les plages de variation possibles des paramètres ont été identifiées ainsi que les éléments susceptibles d'induire des variations dans le comportement global. En conclusion, les éléments nécessaires ont été réunis pour servir de données d'entrée aux analyses de sûreté, que ce soit dans le cadre d'une évolution normale, mais aussi pour la prise en compte de situations altérées reflétant notamment les incertitudes résiduelles.

# 12

## Synthèse générale

---

<b>12.1</b>	<b>Les grands traits caractéristiques de la démarche.....</b>	<b>497</b>
<b>12.2</b>	<b>La description d'ensemble des phénomènes et de l'histoire du stockage .....</b>	<b>498</b>
<b>12.3</b>	<b>Les enseignements.....</b>	<b>501</b>



L'objectif du tome sur l'évolution phénoménologique du stockage est de proposer une description de l'ensemble des processus qui affecte le stockage et son environnement géologique depuis la période de réalisation du stockage jusqu'en phase de post-fermeture, sur une durée de référence du million d'années retenue en lien avec la durée de vie des éléments radioactifs présents dans les déchets.

La description proposée est celle jugée la plus probable au regard des connaissances scientifiques du moment et des avis d'experts. Elle s'appuie en particulier sur les travaux de reconnaissance et de caractérisation menés sur le site de Meuse / Haute-Marne depuis 1994 (forages, campagne géophysique, etc.), sur les données issues du creusement des infrastructures souterraines du laboratoire de recherche, sur les analyses, expérimentations et modélisations développées à partir d'échantillons, sur les travaux menés au laboratoire du Mont Terri en Suisse. Enfin, les travaux similaires conduits par les homologues de l'Andra et, de manière plus générale, les connaissances acquises au travers de problématiques autres que celle du stockage, viennent enrichir les résultats des recherches menées par l'Andra.

## 12.1 Les grands traits caractéristiques de la démarche

Le tome offre en premier lieu une vision de l'état initial du milieu géologique. Il s'attache à décrire ce dernier, à comprendre les déterminants de son évolution passée et donc de sa situation actuelle. Partant de cet état des lieux, il s'attache ensuite à préciser comment ce dernier serait modifié par un stockage, avant de revenir progressivement à un état stationnaire.

La démarche adoptée consiste à passer en revue chaque grand type de phénomène susceptible d'affecter le stockage : thermique, hydraulique, chimique, mécanique, l'ensemble débouchant sur une représentation du comportement des radionucléides dans le milieu. Ce découpage permet de disposer d'une vision complète et simplifiée de tous les processus élémentaires. Elle offre également une compréhension des mécanismes physiques qui sont à l'œuvre. Elle ne se limite toutefois pas là. En effet, certains phénomènes peuvent interagir et présenter des couplages. Il serait délicat de donner une représentation entièrement couplée de tous les phénomènes présents dans le stockage, plus encore sous une forme numérique qui excéderait à la fois les capacités numériques et les modèles disponibles.

En revanche, l'analyse présentée ici permet de comprendre comment chacun des phénomènes peut influencer ou non sur les autres et quels seraient les couplages pertinents à prendre en compte. Cet exercice passe, pour une bonne part, par l'estimation d'ordres de grandeur et par des tests partiels sur la validité des diverses hypothèses. Au total, la représentation fournit une hiérarchisation raisonnée des phénomènes, de leur importance, de leurs interactions afin de définir les grands déterminants à retenir. Cette approche construit une représentation d'ensemble plus aisément appréhendable qui peut, elle-même, faire ensuite l'objet de simplifications pour aboutir à la modélisation prudente fondant les analyses de sûreté.

Le présent tome démontre donc qu'il est possible de parvenir à une appréhension globale du fonctionnement du stockage, suffisamment fidèle à la réalité, mais dans le même temps réduisant sa complexité aux principaux paramètres pesant réellement sur l'évolution générale.

Cette transcription, sous une forme plus interprétable, des phénomènes à l'œuvre dans le stockage repose sur un travail minutieux exploitant les résultats des recherches sur chacun des composants. Chaque phénomène a fait l'objet d'une investigation détaillée pour en calibrer l'importance et en déterminer les principaux effets. Ce n'est qu'au terme de cette approche phénoménologique détaillée qu'il a été possible de construire un tableau plus général mettant en lumière les lignes de force. L'outil pour réaliser ce travail a été l'analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS). En découpant le stockage dans le temps et dans l'espace, pour parvenir à un ensemble de situations plus

aisément interprétables et maîtrisables, ce mode d'approche innovant a permis de transcrire la connaissance acquise en une matière exploitable. L'APSS sous-tend le travail présenté dans ce tome.

La première finalité du tome est d'apporter une compréhension aussi robuste que possible de l'histoire du stockage. En effet, la confiance en le dispositif technique que constitue le stockage repose inéluctablement sur la capacité à se représenter de manière relativement simple et accessible son devenir et ce qui le fonde. Toutefois, au-delà de cette représentation, il est essentiel de pouvoir en extraire une vision encore plus simplifiée, qui fournisse en quelque sorte un schéma de fonctionnement du stockage prudent et bien maîtrisé. Dès lors que les grands phénomènes sont compris, que les ordres de grandeur sont connus, que les implications d'éventuelles évolutions sont appréhendées, il convient de transcrire ce travail sous une forme qui permette l'analyse de sûreté et qui réduise encore la complexité pour permettre une évaluation simple et sans ambiguïté des performances d'une éventuelle installation de stockage. Le tome sur l'évaluation phénoménologique du stockage apporte cette base en donnant la description générale de l'histoire du stockage et des principaux phénomènes. Il éclaire la démarche de sûreté en soulignant les éléments qui peuvent être négligés, ceux qui appellent des représentations prudentes. Ainsi, il constitue une donnée d'entrée pour l'analyse de performance.

Enfin, la compréhension de l'histoire du stockage apparaît aussi déterminante pour l'étude de la réversibilité. Elle en est même un outil essentiel. En effet, assurer la réversibilité du stockage, c'est être en situation à chaque instant de suivre les phénomènes qui s'y déroulent pour prendre, le cas échéant, des dispositions correctives. C'est aussi connaître les paramètres caractéristiques pour apprécier si leur évolution est conforme aux prévisions. C'est enfin maîtriser les temps caractéristiques de vie ou d'évolution de chaque composant pour apprécier comment peuvent se dérouler les différentes étapes d'une exploitation réversible du stockage. Le présent tome a montré quels étaient les déterminants de la vie du stockage et a souligné que ces derniers permettaient d'envisager, sans difficulté particulière, une durée pluriséculaire de réversibilité. Au-delà de cette période, la réversibilité est toujours possible. Elle appelle toutefois des actions complémentaires. Le tome a souligné quels étaient les points clés qui pouvaient faire question et appelaient une attention particulière.

En conclusion, le tome fournit, avec un bon degré de confiance, un récit de l'histoire de la vie du stockage qui dégage les grandes lignes de force et est ainsi le support à la fois pour une gestion réversible et une évaluation de sûreté ancrée dans la connaissance scientifique et technique acquise au cours de ces dernières années.

## **12.2 La description d'ensemble des phénomènes et de l'histoire du stockage**

### **12.2.1 Une évolution marquée par les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien et la conception du stockage**

L'évolution normale du stockage et de son environnement géologique sur le site de Meuse / Haute-Marne est conditionnée en premier lieu par les caractéristiques et les propriétés de la couche du Callovo-Oxfordien, en particulier à l'échelle de la zone de transposition.

L'ensemble des travaux menés en forage, sur échantillons ou dans le cadre des investigations dans le laboratoire souterrain de recherche mettent en exergue les propriétés intrinsèques remarquables des argilites : une faible perméabilité, des capacités de rétention élevées, une faible réactivité chimique (*i.e.* fort pouvoir tampon chimique) face à des sollicitations comme une perturbation alcaline par les eaux des bétons ou un contact avec des métaux, des propriétés mécaniques favorables au creusement d'ouvrages et une aptitude à l'auto-cicatrisation mécanique et hydraulique suite à des déformations ou des ruptures mécaniques.

Les forages inclinés et l'interpolation des données de forages associées aux données de la géophysique attestent l'homogénéité des argilites à l'échelle de l'épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien et à l'échelle de la zone de transposition. Ainsi :

- aucune faille de rejet important (supérieur à 5 mètres) n'a été détectée, conférant à la couche une faible perméabilité en grand ;
- bien que la composition minéralogique des argilites varie entre le toit, le centre et le mur de la couche, la chimie des eaux interstitielles et les propriétés de rétention apparaissent globalement homogènes sur l'épaisseur de la couche et sur toute la zone de transposition.

L'ensemble de ces caractéristiques témoigne également de la stabilité de la couche du Callovo-Oxfordien sur le site de Meuse / Haute-Marne, qui perdure depuis plusieurs dizaines de millions d'années. En particulier, le site de Meuse / Haute-Marne se trouve à l'écart de zones tectoniques actives. Enfin, l'environnement géologique de la couche du Callovo-Oxfordien à l'échelle du site de Meuse / Haute-Marne et de la zone de transposition est caractérisé par des formations encaissantes qui sont très peu aquifères et par des écoulements particulièrement lents. Ces caractéristiques déterminent par ailleurs les exutoires hydrauliques, locaux et régionaux, possibles pour les éventuelles circulations d'eau depuis la zone du stockage, précisant ainsi les points où l'environnement serait susceptible d'être exposé à la radioactivité.

Par ailleurs, la conception du stockage vise à tirer parti de l'ensemble des propriétés de la couche du Callovo-Oxfordien, en limitant au mieux les sollicitations thermique, mécanique, hydraulique et chimique susceptibles d'être créées par le stockage. On recherche ainsi à conserver la faible réactivité de la couche du Callovo-Oxfordien et à la maintenir dans un état le plus proche de son état d'équilibre actuel. L'architecture compartimentée du stockage en zones de stockage éloignées et dédiées à chaque type majeur de déchets, puis en modules à l'intérieur d'une zone conduit à limiter ou empêcher les interactions phénoménologiques à l'intérieur du stockage, donc *in fine* à limiter la complexité des processus mis en jeu dans le stockage et en permettre une bonne maîtrise.

### 12.2.2 Une évolution combinant des processus d'importance inégale dans le temps

Les processus mis en jeu dans le stockage et son environnement géologique se différencient non seulement par leurs extensions spatiale et temporelle respectives, mais également par leurs conséquences.

**Les processus chimiques** s'inscrivent sur des échelles de temps variant de quelques milliers d'années à plusieurs centaines de milliers d'années. Ainsi la corrosion des surconteneurs de colis de déchets C et des conteneurs des assemblages de combustibles usés se déroule *a minima* sur quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'années, les perturbations alcalines engendrées par les eaux cimentaires sur les argilites ou les composants en argile gonflante sur plusieurs centaines de milliers d'années. Toutefois, ils présentent globalement une faible extension spatiale et sont limités au champ proche du stockage, soit aux premiers mètres d'argilites. Par exemple, l'extension de la perturbation alcaline est au maximum de grandeur d'ordre métrique ; celle de la perturbation engendrée par le fer des composants métalliques des alvéoles de déchets C et des alvéoles de combustibles usés étant d'ordre décimétrique. Le caractère limité de l'extension des processus chimiques se retrouve à l'intérieur du stockage : les perturbations alcalines apportées par les bétons sur les composants à base d'argile gonflante comme les bouchons d'alvéole et les scellements de galeries et de puits d'accès n'affectent significativement qu'un faible volume de ces composants. Les interactions des colis de déchets avec leur environnement proche au sein des alvéoles de stockage sont très faibles en comparaison des dimensions métriques à plurimétriques des alvéoles.

**La charge thermique** du stockage affecte l'ensemble des formations géologiques au droit du stockage et, en particulier, la couche du Callovo-Oxfordien. Les températures maximales atteintes dans ces formations sont faibles, au maximum 60 °C dans la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche.

De plus, la durée de la charge thermique n'excède pas la dizaine de milliers d'années avant un retour à des températures proches des conditions géothermales naturelles. Cette ampleur modérée du phénomène n'est pas susceptible d'induire d'effets irréversibles, notamment sur les transformations minéralogiques des argilites ou les contraintes thermomécaniques, ainsi que sur leurs conséquences sur les propriétés hydrauliques et chimiques (chimie des eaux interstitielles et rétention).

**Sur le plan mécanique**, le stockage crée une perturbation mécanique dans les argilites en champ proche du stockage, d'abord lors du creusement des ouvrages, puis lors de leur exploitation du fait de la ventilation, et enfin en phase de post-fermeture en raison de l'évolution mécanique interne des ouvrages liée en particulier aux processus chimiques (dégradation chimique des bétons). L'extension de la perturbation mécanique est d'ordre plurimétrique au maximum. Ses conséquences sur la perméabilité du Callovo-Oxfordien en champ proche s'effacent en grande partie en quelques milliers d'années par auto-cicatrisation (du fait de contraintes mécaniques de compression, du gonflement des smectites contenues dans les argilites et/ou de la précipitation de minéraux dans les fractures / fissures).

Le stockage introduit enfin un ensemble de **perturbations hydrauliques** marquées. La plus significative est le maintien sur une longue période d'un état relativement désaturé du stockage et de sa zone proche, à tout le moins pour certains modules. Cela est dû pour une large part à un transitoire hydraulique lié à la production d'hydrogène lors de la corrosion des composants métalliques. Cet hydrogène vient en effet freiner le processus de resaturation du stockage. Il faut ainsi près de deux cent mille ans pour que la saturation totale soit atteinte dans le stockage. À cet horizon, le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien environnante retrouvent un nouvel état d'équilibre hydraulique. Dans son principe, ce dernier n'est pas sensiblement modifié par rapport à l'état actuel. Ce n'est qu'encore plus tard que l'influence des phénomènes de surface pourra se faire sentir sur les formations qui surplombent les argilites, sans en tout état de cause affecter le Callovo-Oxfordien. De manière générale, les différents transitoires hydrauliques apparaissent comme des facteurs de second ordre par rapport au schéma général gouvernant les écoulements et le transport dans le milieu, ce dernier demeurant majoritaire diffusif, quelles que soient les phases ou les zones du stockage où un transport convectif se développe.

### **12.2.3 Une évolution très limitée de la couche du Callovo-Oxfordien en grand sur le million d'années par rapport à son état actuel**

La couche du Callovo-Oxfordien n'est affectée par les différents processus présentés ci-dessous qu'à proximité immédiate des installations de stockage, sur une épaisseur représentant moins de 10 % de sa puissance. Par ailleurs, les évolutions géodynamiques (principalement les changements climatiques en surface qui affectent les formations géologiques encaissantes, en particulier en termes d'organisation des écoulements et de localisation des exutoires) n'ont d'autre effet sur la couche du Callovo-Oxfordien qu'une modification des conditions hydrauliques aux limites (au niveau du Dogger et de l'Oxfordien carbonaté). La couche du Callovo-Oxfordien conserve donc globalement des caractéristiques proches de celles qu'elle connaît actuellement.

### **12.2.4 Une évolution des écoulements dans les encaissants sur le million d'années**

Les encaissants subissent des modifications significatives liées à la géodynamique externe (changements climatiques) conduisant à une évolution significative des directions d'écoulement sur le prochain million d'années. On peut prévoir de manière relativement fiable les grandes directions et leur transformation. En particulier, avec les évolutions géodynamiques, de nouvelles directions locales d'écoulement apparaissent. Ces modifications deviennent sensibles dès quelques centaines de milliers d'années et se poursuivent jusqu'au million d'années et après.

### 12.2.5 Un lent relâchement des radionucléides par les colis de déchets gouverné par les installations de stockage et le milieu géologique

La stabilité de la couche du Callovo-Oxfordien dans le temps et ses caractéristiques hydrauliques concourent à une dégradation chimique très lente ou limitée des alvéoles de stockage. C'est le cas des colis de déchets et de leur environnement immédiat comme le béton des alvéoles de déchets B ou la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés. Les cinétiques lentes des processus de dégradation chimique conduisent à un relâchement très progressif des radionucléides par les colis de déchets. En outre, la lente corrosion des surconteneurs métalliques de déchets C ne permet l'arrivée d'eau au contact des verres qu'après plusieurs milliers à dizaines de milliers d'années, soit au-delà de la charge thermique. Il en va de même pour les conteneurs de combustibles usés.

Ainsi, de manière générale, l'environnement rencontré par les radionucléides, qui sont progressivement relâchés au sein des alvéoles de stockage, est celui constitué, selon les déchets, par une couche du Callovo-Oxfordien proche de son état actuel, par de l'argile gonflante proche aussi de son état initial ou par du béton peu ou pas dégradé.

La combinaison d'un transfert diffusif lent, des capacités de rétention élevées et des faibles solubilités au sein des alvéoles de stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien conduisent à une migration lente et d'extension limitée de l'essentiel des radionucléides relâchés par les colis de déchets. C'est en particulier le cas des actinides qui restent piégés dans le stockage ou ne migrent que sur quelques mètres dans les argilites en champ proche sur le prochain million d'années. Seuls les radionucléides et les toxiques chimiques dits mobiles (*i.e.* à forte solubilité et faible rétention), les deux principaux étant  $^{129}\text{I}$  et le  $^{36}\text{Cl}$  atteignent en (très) faible concentration et en plusieurs centaines de milliers d'années *a minima* les encaissants.

### 12.3 Les enseignements

Plusieurs grands enseignements émergent de ce tome consacré à l'évolution phénoménologique du stockage.

En premier lieu, la compréhension acquise des différents phénomènes, de leurs temps caractéristiques et de leur mode de représentation fournit une vision d'ensemble cohérente du stockage et de l'histoire de son évolution. Ce résultat est important dans la mesure où il constitue une base pour apprécier les performances de l'installation. L'histoire du stockage est prévue, de manière assez précise, avec un degré de confiance raisonnable. Certes, il n'est pas possible d'affirmer disposer d'une connaissance détaillée de chaque évolution singulière. En revanche, le schéma général apparaît relativement robuste et peu sensible aux aléas. Ces derniers ont de plus été identifiés, permettant ainsi d'apprécier le poids des différents facteurs dans la performance globale.

Des incertitudes demeurent sur la représentation fournie. Par définition, dès lors qu'il s'agit de prévoir une évolution sur des durées de l'ordre du million d'années et sur une échelle spatiale considérable, il serait présomptueux de prétendre effectuer une prédiction absolue. En revanche, on peut aujourd'hui dessiner une histoire générale qui englobe le spectre des évolutions les plus vraisemblables. Par rapport à ce dernier, les incertitudes apparaissent maîtrisées dans la mesure où celles qui pèsent de manière significative sur la représentation ont été appréhendées, ainsi que les plages de variation associées. Il est dès lors loisible de définir des options prudentes, permettant soit d'englober les futurs possibles, soit de se mettre à l'abri de certains aléas.

L'histoire du stockage présentée dans ce tome se fonde sur les concepts et architectures définis au terme des études d'ingénierie. Elle constitue *a posteriori* une confirmation du bien fondé de ces derniers. En effet, on a pu constater que ces concepts permettaient d'exploiter au mieux les propriétés favorables du milieu et de pallier les incertitudes éventuelles. De ce point de vue, la vision d'ensemble

présentée apparaît robuste car elle se fonde sur des choix réalistes et prudents en matière d'architecture, qui conduisent eux-mêmes à tirer le meilleur parti du milieu géologique.

La description détaillée des phénomènes et les incertitudes associées ont suggéré des pistes de progrès pour la recherche. Schématiquement, ces dernières s'articulent autour de trois thèmes distincts :

- une caractérisation plus fouillée et à grande échelle du milieu géologique pour préciser les marges de sûreté qui ont été négligées à ce stade,
- des réalisations technologiques en vraie grandeur pour affiner la compréhension détaillée du comportement des alvéoles de déchets,
- quelques études complémentaires sur les mécanismes fondamentaux régissant le comportement mécanique, le relâchement et le transport des radionucléides afin de disposer de modèles plus fins pour la représentation.

Enfin, le tome a dressé un tableau général qui constitue une donnée d'entrée directement utilisable par la sûreté. La hiérarchisation proposée des phénomènes est le socle du modèle de sûreté en ce sens qu'elle apporte les éléments nécessaires pour guider le choix des modèles, des simplifications envisageables et des paramètres à retenir. La compréhension globale acquise du système devient ainsi l'outil pour s'assurer qu'une vision prudente de l'évolution du stockage, intégrant des degrés de conservatisme, notamment en négligeant des aspects favorables à la sûreté ou en retenant des paramètres pénalisants, peut être élaborée et apporter une garantie quant à la possibilité de disposer d'une installation réaliste d'un point de vue industriel et sûre sur le long terme.

## Références bibliographiques

---

- Adler M. (2001) Interaction of claystone and hyperalkaline solutions at 30°C: A combined experimental and modelling study; Thèse de l'Université de Bern, Suisse, 119 p.
- Advocat T. (1991) Les mécanismes de corrosion en phase aqueuse du verre nucléaire R7T7. Approche expérimentale. Essai de modélisation thermodynamique et cinétique; Thèse de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 213 p.
- Advocat T., Crovisier J.L., Fritz B. & Vernaz E. (1990) Thermokinetic model of borosilicate glass dissolution: contextual affinity. *Scientific Basis for Nuclear Waste Management*, XIII, pp. 241-248.
- Advocat T., Jollivet P., Crovisier J.L. & del Nero M. (2001) Long-term alteration mechanisms in water for SON68 radioactive borosilicate glass. *Journal of Nuclear Materials*, 298(1-2), pp. 55-62.
- Aertsens M. & Van Iseghem P. (1996) Modelling Glass Dissolution with a Monte Carlo Technique. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 412, pp. 271-278.
- Albrecht A. & Gallerand M.-O. (2005) Evaluation des facteurs de conversion biosphères pour les radionucléides et des risques associés aux toxiques chimiques. Modélisation de leur comportement dans les biosphères de référence - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASTR.03.110.
- Altmann S. & Coelho D. (2005) Le modèle d'écoulement et de transport des solutés dans le Callovo-Oxfordien sain et perturbé - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASTR.03.0022.
- Altmann S. & Jacquot E. (2005) La chimie des eaux interstitielles dans la couche du Callovo-Oxfordien à l'état initial - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASTR.03.023.
- Andersen B.J. & Borns H.W.J. (1994) The ice age world. An introduction to Quaternary history and research with emphasis on North America and Northern Europe during the last 2.5 millions years. Scandinavian University Press. Oslo-Copenhagen-Stockholm. Distrib. By Oxford University Press, 208 p.
- Andra (2003a) HAVL-Argile. Sélection des valeurs des paramètres de transfert dans la biosphère des radionucléides et toxiques chimiques pour le dossier 2005. Rapport Andra n° SUR.NT.ASTR.03.044.
- Andra (2003b) Rapport de synthèse du Kimméridgien - Laboratoire de recherche souterrain de Meuse / Haute-Marne - Lot 4 - Puits d'accès et auxiliaire. Rapport Andra n° D.RP.0ANT.02.021.

- Andra (2003c) Synthèse hydrogéologique des calcaires du Barrois. Bilan des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur le site de l'Est Laboratoire de recherche souterrain de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° D.RP.0HYN.03.004.
- Andra (2004a) Forages de reconnaissance de la formation. Synthèse FRF. Laboratoire de recherche souterrain de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° D.RP.ADPE.04.1245.
- Andra (2004b) Forages Scientifiques Profonds. Synthèse FSP. Laboratoire de recherche souterrain de Meuse / Haute-Marne (3 volumes). Rapport Andra n° D.RP.ADPE.03.0753.
- Andra (2004c) Oxfordien calcaire - Rapport de synthèse - Laboratoire de recherche souterrain de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° D.RP.ADPE.04.1109.
- Andra (2005a) Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) - Phase d'exploitation d'un stockage en formation argileuse profonde - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASIT.03.077.
- Andra (2005b) Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) - Phase post-fermeture d'un stockage en formation argileuse profonde - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASIT.03.133.
- Andra (2005c) Analyse qualitative de sûreté à long terme d'un stockage en formation argileuse profonde - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.AMES.04.0049.
- Andra (2005d) Dossier 2005 - Référentiel de comportement des colis de déchets à haute activité et à vie longue. Rapport Andra n° C.RP.ASCM.04.0017.
- Andra (2005e) Dossier 2005 - Référentiel de connaissance et modèle d'inventaire des colis de déchets à haute activité et à vie longue. Rapport Andra n° C.RP.AHVL.04.0006.
- Andra (2005f) Dossier 2005 - Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue. 4 Tomes. Rapport Andra n° C.RP.ACSM.04.0015.
- Andra (2005g) Dossier 2005 argile - Référentiel de comportement des radionucléides et des toxiques chimiques d'un stockage dans le Callovo-Oxfordien jusqu'à l'homme - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.RP.ASTR.04.0032.
- Andra (2005h) Dossier 2005 argile - Référentiel du site de Meuse / Haute-Marne. 3 Tomes. Rapport Andra n° C.RP.ADS.04.0022.
- Andra (2005i) Dossier 2005 argile - Tome - Architecture et gestion du stockage géologique. Rapport Andra n° C.RP.ADP.04.0001.
- Andra (2005j) Dossier 2005 argile - Tome - Evaluation de sûreté du stockage géologique. Rapport Andra n° C.RP.ADSQ.04.0022.
- Andra (2005k) Le transitoire redox dans un stockage et dans le Callovo-Oxfordien en champ proche. Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASIT.03.127.

- Andra (2005l) L'évolution phénoménologique des galeries d'un stockage et le comportement des radionucléides dans les galeries - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASIT.04.0014.
- Andra (2005m) Rapport de synthèse des calculs de sûreté du Dossier Argile 2005 - Scénario d'Evolution Normale - Calculs de référence et de sensibilité. Rapport Andra n° C.RP.ACSS.05.0005.
- Andra (2005n) Spécification technique de besoin d'un stockage en formation argileuse profonde - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.SP.AHVL.02.132.
- Andra / CNF-INQUA (1999) La France pendant les deux derniers extrêmes climatiques. Variabilité naturelle des environnements (cartes à l'échelle 1/ 1 000 000 et notice). Co-édition Andra/CNF-INQUA, publi. Andra Châtenay-Malabry.
- ANTEA (1999) Site Meuse / Haute-Marne. Mise en oeuvre du modèle hydrodynamique régional pour simuler quelques contextes hydrogéologiques géoprospectifs. Rapport Andra n° D.RP.0ANT.99.056.
- Ata A., Shao J.F. & Ozanam O. (2002) Numerical Analysis of Induced Damage due to the Drying in Geological Barrier. Workshop of Hydromechanical and thermohydromechanical behaviour of deep argillaceous rock, Oct 2000, Paris. Balkema-2002 Ed., p. 199-213.
- Barnichon J.D. & Su K. (2005a) Le comportement mécanique d'alvéoles de stockage de déchets B dans le temps - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.RP.ASMG.03.0110.
- Barnichon J.D. & Su K. (2005b) Le comportement mécanique des scellements de galeries dans le temps - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.RP.ASMG.03.111.
- Barnichon J.D. & Su K. (2005c) Le comportement mécanique des scellements de puits dans le temps - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.RP.ASMG.03.112.
- Baston G.M.N., Berry J.A., Boulton K.A., Brownsword M. & Linklater C.M. (1994) Effects of cellulosic degradation products on uranium sorption in the geosphere. *Journal of alloys and compounds*, 213-214, pp. 475-480.
- Bauer C. (2005) La charge thermique d'un stockage - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASIT.03.118.
- Bauer C., Piguet J.P. & Wileveau Y. (2003) Disturbance assessment at the wall of a vertical blasted shaft in marls. Proc. of the 10th Int. Congress on Rock Mechanics (ISRM) Vol. 1 - Sandton, Afrique du Sud, 8-12 septembre 2003, pp 93-98, Ed SANIRE & SAIMM (ISBN 1-919783-52-0).
- Berger A. (1992) Le climat de la terre. Un passé pour quel avenir ? Ed. De Boek Université, p. 479.
- Bergerat F. (1985) Déformations cassantes et champs de contrainte tertiaires dans la plateforme européenne.; Thèse Université Pierre & Marie Curie, Paris, 375 p.

- Bernat P. (1994) Etude du comportement des enrobés bitumeux sous irradiation gamma. Influence des constituants provenant du procédé ST3 de décontamination des effluents liquides; Thèse de l'Université Paris V, René Descartes, Paris, 240 p.
- BIOCLIM (2002) Global climatic features over the next million years and recommendation for specific situations to be considered. Bioclim Deliverable D3.
- BIOCLIM (2003a) Development of the rule-based down-scaling methodology for BIOCLIM Workpackage 3. Bioclim Deliverable D8a.
- BIOCLIM (2003b) Global climatic characteristics, including vegetation and seasonal cycles over Europe, for snapshots over the next 200,000 years. Bioclim Deliverable D4-D5.
- Boisson J.Y. (1998) Preliminary EDZ investigations in argillaceous rock from old tunnel and new galleries at Tournemire I.P.S.N. site (Aveyron, France). OECD/NEA/RWMC coordination group on site evaluation and design of experiments for radioactive waste disposal SEDE) 9th meeting, 23-25 september 1998, Paris, France.
- Bossart P., Meier P.M., Moeri A., Trick T. & Mayor J.C. (2002) Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock laboratory. *Engineering Geology*, 2040, Vol. 66, Issues 1-2, October 2002, pp. 19-38.
- Bouchet A., Meunier A. & Sardini P. (2000) Les minéraux argileux : structure cristalline, identification par diffraction de rayons X. *Bull. Centre Rech. Elf Explor. Prod.*, Mém. 23, pp. 136.
- Bourbon X. (2005) L'évolution chimique des ouvrages d'un stockage à base de béton : alvéoles de stockage de déchets B, appuis de scellements et de bouchons d'alvéoles, infrastructures des galeries - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASCM.03.021.
- Bourcier W.L., Peiffer D.W., Knauss K.G., McKeegan K.D. & Smith D.K. (1990) A kinetic model for borosilicate glass dissolution based on the dissolution affinity of a surface alteration layer. *Scientific Basis for Nuclear Waste Management*, XIII, pp. 209-216.
- Bourrelier P.-H. & Berthelin J. (1998) Contamination des sols par les éléments en traces : les risques et leur gestion. Académie des Sciences, Rapport n°42, Lavoisier TEC & DOC, Paris, 440 p.
- BRGM & ELF Aquitaine (1976) Potentiel géothermique du Bassin parisien - Rapport de fin de contrat DGRST. Rapport n° 74.7.0990.
- Brodersen K. (1999) Hygroscopic materials in bituminized waste : experiments and modelling. Radwaste Bituminization 99, Proceedings of the international workshop on the safety and performance evaluation of bituminization processus for radioactive waste, Prague, Czech Republic, june 29 - july 2, 1999.
- Brulhet J. (2005a) L'aléa sismique à long terme et son impact pour un stockage - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASMG.03.0102.

- Brulhet J. (2005b) L'évolution géodynamique (tectonique et climatique) et son impact sur l'hydrogéologie et l'environnement de surface - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASMG.03.0106.
- Bühler C., Heitz D., Trick T. & Frieg B. (2003) In situ Self-Sealing of the EDZ as a Consequence of Loading. In: *Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories* (Ed. by E. Commission), pp. 281-286, Luxembourg, 3 to 5 November 2003.
- Buschaert S. (2001) Origine, âge et processus physico-chimiques des circulations dans les fractures. Exemple du socle sous couverture (Vienne) et des formations riches en argiles (Gard et Est). Thèse de doctorat, Université de Nancy I, rapport FORPRO 2001/28Th, 260 p.
- Buschaert S., Fourcade S., Cathelineau M., Deloule E., Martineau F., Ayt Ougougdal M. & Trouiller A. (2004) Widespread cementation induced by inflow of continental water in the eastern part of the Paris basin : O and C isotopic study of carbonate cement. *App. Geochem.*, 19-8, pp. 1201-1215.
- Buschaert S. & Giffaut E. (2005) La solubilité et la rétention des radionucléides et des toxiques chimiques dans les encaissants - Site Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASTR.03.104.
- Camaro S., Simondi-Teisseire B. & Vistoli P.P. (1999) Long-term behaviour of bituminized waste . Radwaste Bituminization 99, Proceedings of the international workshop on the safety and performance evaluation of bituminization processus for radioactive waste, Prague, Czech Republic, june 29 - july 2, 1999., pp.
- Carnahan C.L. (1985) Thermodynamically coupled mass transport process in a saturated clay. *Proc. Mat. Res. Soc. Symp*, Vol. 44, pp. 491-498.
- Carpentier C. (2004) Géométries et environnements de dépôt de l'Oxfordien de l'est du bassin de Paris. Thèse Université Nancy-1, 470 p., 4 annexes.
- Cathelineau M. & Mosser R. (1998) Recherches sur la stabilité thermique des formations argileuses de la Haute-Marne et silteuses du Gard- années 1997-1998 : Rapport final. Rapport CREGU n° D.RP.0CRE.98.005.
- Caurel J., Vernaz E. & Beaufort D. (1990) Hydrothermal leaching of R7-T7 borosilicates glass (nuclear waste glass). *Scientific Basis for Nuclear Waste Management*, XIII, pp. 309-318.
- Cavelier C., Mégnien C., Pomerol C. & Rat P. (1980a) Introduction à la géologie du Bassin de Paris. *Bull. d'inf. géol. du Bassin de Paris*, Vol.16, n°4, pp.
- Cavelier *et al.* (1980b) Bassin de Paris, in *Géologie de pays européens - France, Belgique, Luxembourg*, Dunod.
- Chabiron A. & Plas F. (2005) L'évolution phénoménologique normale d'un stockage en formation argileuse profonde - Site de Meuse / Haute-Marne - Les processus majeurs :

- nature, temps caractéristiques et principaux couplages. Rapport Andra n° C.NT.ASIT.04.0012.
- Chamley H. (1989) Clay sedimentology. Springer-Verlag, 623p.
- Chandler N.A. & *et al.* (2002) The five year report on the tuneel sealing experiment : an international project of AECL. Rapport JNC, ANDRA and WIPP, n° AECL-12127.
- Charpentier D. (2001) Rôle de l'oxydation chimique et de l'acidification des eaux sur les propriétés minéralogiques et physico-chimiques de la formation argileuse de Tournemire. Thèse de l'Université Henry Poincaré, Nancy I, France, 255 p.
- Chermak J.A. (1992a) Low temperature experimental investigation of the effect of high pH KOH solutions on the Opalinus Shale, Switzerland. *Clays Clay Miner*, 41, pp. 365-372.
- Chermak J.A. (1992b) Low temperature experimental investigation of the effect of high pH NaOH solutions on the Opalinus Shale, Switzerland. *Clays Clay Miner*, 40, pp. 650-658.
- Choquette P.W. & Pray L.C. (1972) Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *Carbonates rocks II: porosity and classification of reservoir rocks, AAPG Reprint series*, Vol. 5, pp. 154-197.
- Clauer N., Buschaert S., Cathelineau M., Disnar J.R., Duplay J., Elie M., Géraud Y., Henry J.P., Javoy M., Landais P., Lavastre V., Liewig N., Marty B., Orberger B., Pagel M., Raynaud S. & Rousset D. (2001) Evolution diagénétique des formations argileuses très imperméables de l'Est et du Gard. Action FORPRO 98 IV. Rapport Forpro 2001/04 Rj. 284 p.
- Coelho D. (2005) La thermo-convection dans la couche du Callovo-Oxfordien et les formations géologiques encaissantes sous l'effet de la charge thermique d'un stockage - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASTR.03.105.
- Colenco Power Engineering (2004) Modélisation de la migration des gaz dans les alvéoles de déchets B. Rapport Andra n° C.RP.OCPE.04.007.
- Conrad R., Aragno M. & Seiler W. (1983) Production and Consumption of Hydrogen in a eutrophic lake. *Appl. Environ. Microbiol.*, 45(2), pp. 502-510.
- Coulon M. (1992) La distension oligocène dans le nord-est du bassin de Paris (perturbation des directions d'extension et distribution des stylolites). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 5, pp. 531-540.
- Crovisier J.L., Advocat T., Petit J.C. & Fritz B. (1989) Alteration of basaltic glass in Iceland as a natural analogue for nuclear waste glasses : geochemical modelling with DISSOL. *Scientific Basis for Nuclear Waste Management*, XII, pp. 57-64.
- Crusset D. (2005) La corrosion des composants métalliques d'un stockage : les (sur)conteneurs de colis de déchets vitrifiés et de combustibles usés et les infrastructures métalliques - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASCM.03.0046.

- David D. (2003) Analogues archéologique et corrosion. Matériaux. Collection Sciences et Techniques. pp 75.
- De Marsily G. (1981) Hydrogéologie quantitative. Masson, Paris, 215 p.
- De Windt L., Pellegrini D. & van der Lee J. (2004) Coupled modeling of cement/claystone interactions and radionuclide migration. *J. Contam. Hydrol.*, 68, pp. 165-182.
- Dejonghe P. (1999) Development of industry applications of bituminization processes - a historical review. Radwaste bituminization '99, proceedings of the international workshop on the safety and performance evaluation of bituminization processes for radioactive waste. Nuclear research institute rez (Czech Republic) Belgoprocess, Rez near Prague, pp. 11-16.
- Del Nero M., Salah S., Miura T., Clément A. & Gauthier-Lafaye F. (1999) Sorption/Desorption Processes of Uranium in Clayey Samples of the Bangombé Natural Reactor Zone, Gabon. *Radiochimica Acta*, 87, pp. 135-149.
- Deneux-Mustin S., Roussel-Debet S., Mustin C., Henner P., Munier-Lamy C., Colle C., Berthelin J., Garnier-Laplace J. & Leyval C. (2003) Mobilité et transfert racinaire des éléments en traces : influence des micro-organismes du sol. Editions TEC & DOC, Paris, 282 p.
- Dercourt J., Ricou L.E. & Vrielynck B. (1993) Atlas - Thétys - Paléoenvironmental maps. CCGM Diffusion, Paris.
- Deschamps P. (2003) Traçage de la mobilité des radionucléides naturels en milieu sédimentaire profond à l'aide des déséquilibres radioactifs ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) : application aux formations mésozoïques de l'Est du bassin de Paris. Thèse Université du Québec, Montréal / Université Paris-Sud, 191 p. + annexes, Andra, D.RP.0UNQ.03.001.
- Deschamps P., Hillaire-Marcel C., Michelot J.L., Doucelance R., Ghaleb B. & Buschaert S. (2004)  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  disequilibrium along stylolitic discontinuities in deep mesozoic limestone formations of the eastern Paris basin: evidence for discrete uranium mobility over the last 1-2 million years. *Hydrogeology and Earth System Science*, 8(1), pp. 35-46.
- Dewonck S. (2000) Géochimie isotopique des gaz rares dans les roches sédimentaires et les eaux souterraines de l'Est du Bassin de Paris. Contribution aux transferts massiques intrabassinaux; Thèse INPL, Nancy, France, 247 p.
- Donsimoni M. (1981) La bassin houiller lorrain. Mém. 15 pl. ht. BRGM, pp.100.
- Elie M., Faure P., Michels R., Landais P. & Griffault L. (2000) Natural and laboratory oxidation of low-organic-carbon-content sediments: comparison of chemical changes in hydrocarbons. *Energy & Fuels*, 14, n°4, pp. 854-861.
- Elion P. (2005) Le modèle géologique du Callovo-Oxfordien à l'état initial - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASMG.03.0101.
- Espitalié J., Marquis F. & Sage L. (1987) Organic geochemistry of the Paris basin. In Petroleum geology of North West Europe. J. Brooks and K. Glennie, pp.71-86.

- European commission (2003) Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories, Proceedings of a European Commission Cluster conference and workshop, Luxembourg, 3 to 5 November 2003.
- Faure P., Landais P. & Griffault L. (1999) Behaviour of organic matter from Callovian shales during low temperature air oxidation. *Fuel*, Vol. 78, pp. 1515-1525.
- Fillet S. (1987) Mécanisme de corrosion et comportement des actinides dans le verre nucléaire "R7T7". Thèse de l'Université du Languedoc, Montpellier, France, 338 p.
- Ganster P. (2004) Modélisation de verres intervenant dans le conditionnement des déchets radioactifs par dynamiques moléculaires classique et ab initio; Thèse de l'université de Montpellier, 177 p.
- Gaucher E., Blanc P., Matray J.M. & Michau N. (2004) Modeling diffusion of an alkaline plume in a clay. *Appl. Geochem*, Vol. 19, pp. 1505-1515.
- Geotti-Bianchini F. & De Riu L. (1995) Infrared Spectroscopic analysis of water incorporated in the structure of industrial soda-lime-silica glasses. *Glastech. Ber. - Glass Sci. Technol.*, 68, 7, pp. 228-240.
- Geotti-Bianchini F., De Riu L., Gagliardi G., Guglielmi M. & Pantano C.G. (1991) New interpretation of the IR reflectance spectra of SiO<sub>2</sub>-rich films soda-lime glass. *Glastech. Ber. - Glass Sci. Technol.*, 64, 8, pp. 205-217.
- Giffaut E. (2005) La solubilité et la rétention de radionucléides et de toxiques chimiques au sein d'alvéoles de stockage de déchets B - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASTR.03.106.
- Giffaut E. & Buschaert S. (2005) La solubilité et la rétention de radionucléides et de toxiques chimiques au sein du Callovo-Oxfordien sain et perturbé - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASTR.03.099.
- Giffaut E. & Coelho D. (2005) La solubilité, la rétention et le transport de radionucléides et de toxiques chimiques au sein d'alvéoles de stockage de colis de déchets C et de combustibles usés - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASTR.03.108.
- Girard J.P., Flehoc C., Gaucher E., Prinzhofer A. & Chappellaz J. (2002) Isotopic study of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> out-gassed from argillites investigated for radioactive waste repository. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, Vol. 66, pp. A274.
- Girard J.-P., Fléhoc C., Gaucher E., Prinzhofer A., Huiban Y. & Noirez S. (2003) Projet Isogaz : Caractérisation isotopique des gaz émis par les argilites du Callovo-Oxfordien, Rapport d'avancement de la phase 2. Rap. BRGM/RP-52834-FR. Rapport Andra n° D.RP.PSTR.04.008.
- Glaus M.A. & Van Loon L.R. (2004) Cellulose degradation at alkaline conditions: long-term experiments at elevated temperatures. Rapport Nagra n° Technical Report 03-08.
- Goguel J. (1987) Hydrogéologie des roches imperméables. *Hydrogéologie*, n°3, pp. 155-160.

- Gonçalvès J. (2002) Modélisation 3D de l'évolution géologique du bassin de Paris: implications diagénétiques et hydrogéologiques. Thèse Université Paris VI Pierre et Marie Curie, Paris, France, 312 p., p.
- Gonçalvès J., De Marsily G., Violette S. & Wendling J. (2004) Analytical and numerical solutions for alternative overpressuring processes: Application to the Callovo-Oxfordian in the Paris Basin, France. *J. Geophysical Research* (A paraître). pp.
- Gorgeon L. (1994) Contribution à la modélisation physico-chimique de la rétention de radioéléments à vie longue par des matériaux argileux; Thèse de l'Université Paris 6, p.
- Grambow B. (1985) A general rate equation for nuclear waste glass corrosion. *Scientific Basis for Nuclear Waste Management*, VIII, pp. 15-27.
- Grambow B., Jercinovic M.J., Ewing R.C. & Byers C.D. (1985) Weathered basalt glass: a natural analogue for the effects of reaction progress on nuclear waste glass alteration. *Scientific Basis for Nuclear Waste Management*, IX, pp. 263-272.
- Grambow B. & Müller R. (2001) First-order dissolution rate law and the role of surface layers in glass performance assessment. *Journal of Nuclear Materials*, 298, pp. 112-124.
- Gras J.M. (2001) Modélisation semi empirique de la corrosion des aciers non alliés en situation de stockage. Actualisation du modèle EDF 1996. Rapport EDR R&D n° HT-40/01/004.
- Grauls D. (1999) Overpressures : causal mechanisms, conventional and hydromechanical approches. *Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP*, Vol. 54, N°6, pp. 667-678.
- Grellet B., Combes P., Granier T. & Philip H. (1993) Sismotectonique de la France métropolitaine dans son cadre géologique et géophysique, avec atlas de 23 cartes au 1/4 000 000 et une carte au 1/1 000 000. Mém. Soc. Géol. Fr., n°164, 2 vol.
- Guillaume D. (2002) Etude expérimentale du système fer - smectite en présence de solutions à 80°C et 300°C. Thèse de l'Université Henry Poincaré, Nancy I, France, 209 p.
- Guillaume D., Neaman A., Cathelineau M., Mosser-Ruck R., C. P., Abdelmoula M., Dubessy J., Villiéras F. & Michau N. (2003) Experimental synthesis of chlorite from smectite at 300°C in the presence of metallic iron. *Clay Minerals*, Vol. 38, pp. 281-302.
- Guillocheau F., Robin C., Allemand P., Bourquin S., Brault N., Dromart G., Friedenberg R., Garcia J.-P., Gaultier J.-M., Gaumet F., Grosdoy B., Hanot F., Le Strat P., Mettraux M., Nalpas T., Prijac C., Rigollet C., Serrano O. & Grandjean G. (2000) Meso-Cenozoic geodynamic evolution of the Paris Basin : 3D stratigraphic constrains. *Geodin. Acta* 13, pp. 189-246.
- Guillocheau F., Robin C., Mettraux M., Dagallier G., Robin F.X. & Le Solleuz A. (2002) Le Jurassique de l'est du Bassin de Paris. *Bull. d'inf. géol. du Bassin de Paris - Volume* 39, n°3, pp. 23-47.

- Gwinner B. (2004) Comportement sous eau des déchets radioactifs bitumés : validation expérimentale du modèle de dégradation COLONBO; Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 205 p.
- Hanzo M. & Espitalié J. (1994) Relationship between organic matter and sedimentation in the Lias of Lorraine. In Hydrocarbon and petroleum geology of France, special publication of E.A.P.G. n°4. *Springer Verlag.*, pp. 121-136.
- Hlavacek M. C.P., Doods J.A. & Sardin M. (1995) Interpreting titration data of aqueous lattices by coupling surface ionisation and ion exchange equilibria. *Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 95, pp. 101-111.
- Hoek E. & Brown E.T. (1980) Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Eng. Div. ASCE*, 106, N° GT9, pp. 1013-1035.
- Horie K., Hidaka H. & Gauthier-Lafaye F. (2004) Isotopic evidence for trapped fissionogenic REE and nucleogenic Pu in apatite and Pb evolution at the Oklo natural reactor. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68, pp. 115-125.
- Horseman S.-T., Higgs J.J.W., Alexander J. & Harrington J. (1996) Water, Gas and Solute Movement through Argillaceous Media. Report. Rapport NEA n° CC-96/1.
- IAEA (2003) "Reference Biospheres" for solid radioactive waste disposal. Rapport International Atomic Energy Agency n° IAEA-BIOMASS-6.
- IFP (2004) Site Meuse / Haute-Marne - Evolution du modèle Hydrogéologique Région/Secteur - Ecoulement et transfert en aquifère - Rapport Final 2004. 2 tomes. Rapport Andra n° C.RP.0IFP.04.58158.
- Jacquot E. & Dimier A. (2005) Multidimensional modelling of clay-cement interactions using the alliances coupling geochemistry-transport tool, Abstracts : 2<sup>nd</sup> int. meeting - Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Tours, March 14-18, pp. 21-22.
- Jacquot E. & Michau N. (2005) La perturbation alcaline liée à un stockage : les argilites du Callovo-Oxfordien en champ proche et les composants à base d'argile gonflante - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASTR.03.069.
- Jégou C., Gin S. & Larché F. (2000) Alteration kinetics of a simplified nuclear glass in an aqueous medium : effects of solution chemistry and of protective gel properties on diminishing the alteration rate. *Journal of Nuclear Materials*, 280, pp. 216-219.
- JNC (2000) H12 : project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan. Rapport JNC n° TN1410 2000-003.
- Johnson L.H., Niemeyer M., Klubertanz G., Siegel P. & Gribi P. (2002) Calculations of the temperature evolution of a repository for spent fuel, vitrified high-level waste and intermediate level waste in Opalinus clay. Rapport NAGRA Technical n° 01-04.
- Johnson L.H. & Schwyn B. (2004) Proceedings of a workshop on the release and transport of C-14 in repository environment. Interner Bericht . Rapport Nagra n° 04-03.

- Joussaume S. (1999) Climat d'hier à demain, Ed. CNRS, 144 p.
- Koepnick R.B., Denison R.E., Burke W.H., Hetherington E.A. & Dahl D.A. (1990) Construction of the Triassic and Jurassic portion of the Phanerozoic curve of seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . *Chemical Geology*, 80, pp. 327-349.
- Krakenberger A. (1983) Etude sédimentologique et diagénétique du Bathonien supérieur et du Callovien inférieur carbonatés de la bordure orientale du Bassin de Paris; Thèse Université de Nancy I, Nancy, France, 158 p.
- Kruger M.A., Landais P., Bensley D.F., Stankiewicz B.A., Elie M. & Ruau O. (1997) Separation and artificial maturation of macerals from type II kerogen. *Energy & Fuels*, pp. 50-514.
- Kull H., Jockwer N., Zhang C.L., Wileveau Y. & Pepa S. (2005) Measurement of thermally-induced pore water pressure increase and gas migration in the Opalinus clay, Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Tours 2nd international meeting, March 14-18, 2005 à paraître.
- Landais P., Monin J.C., Monthieux M., Poty B. & Zaugg P. (1989) Détermination expérimentale de l'évolution d'indicateurs de maturation de la matière organique. Application aux kérogènes du Toarcien du Bassin de Paris. *C.R.Ac.Sc.*, 308, II, pp. 1161-1166.
- Lavastre V. (2002) Evénements sédimentaires, diagénétiques et post-diagénétiques dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien (Bassin de Paris, France) : enregistrement isotopique des minéraux et de l'eau porale. Thèse de doctorat de l'université de Paris VII, Rapport FORPRO 2002/13Th, Paris, France, 195 p.
- Le Pichon X. (2004) Origin of post-Eocen extension within the African-Eurasian collision. Réunion des Sciences de la Terre, 20-25 sept. 2004, Strasbourg. Livre des résumés.
- Ledieu A. (2004) Altération par l'eau des verres borosilicatés : expériences, modélisation et simulations Monte-Carlo; Thèse de l'Ecole Polytechnique, 190 p.
- Leger B., Roussel J.C., Guerpillon Y. & Allagnat D. (1999) Dix ans de mesures géotechniques dans les marnes du tunnel de la Chamoise. Proc. 9ème congrès SIMR, 1999, Paris, pp. 1309-1312.
- Leroux J. & Harmand D. (1998) Contrôle morphostructural de l'histoire d'un réseau hydrographique : le site de capture de la Moselle. *Geodin. Acta 13*, Acta 11, 4, pp. 149-162.
- Libert M. (2005) Evaluation d'une activité bactérienne dans les colis/alvéoles de stockage - Colis C et CU. Rapport CEA n° DEN/DTN/SMTM/LMTE/04-83.
- Libert M.F. (1999) Biodégradation des matériaux utilisés pour l'enrobage de déchets nucléaires : un exemple le bitume. *Bull. Soc. Fr. Microbiol.*, Vol. 14, n°4, pp. 267-271.
- Lide D.R. (2002) Handbook of Chemistry and Physics, 83rd edition 2002-2003, CRC Press.

- Loi n°91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs.
- Louret M.F. & Berger A. (2000) Future climatic change : are we entering an exceptionally long interglacial ? *Climatic change*, 46, pp. 61-90.
- LSCE / CEA (2004) Site Meuse / Haute-Marne. Modélisation générique de l'impact de l'évolution géomorphologique sur l'hydrogéologie du site. Rapport Andra n° C.RP.12CEA.04.001.
- Lutze W., Malow G., Ewing R.C., Jercinovic M.J. & Keil K. (1985) Alteration of basalt glasses: implications for modelling the long- term stability of nuclear waste glasses. *Nature*, 314, 6008, pp. 252-255.
- Mäder U.K. & Mazurek M. (1998) Oxidation phenomena and processes in Opalinus clay: evidence from the excavation disturbed zones in Hauenstein and Mont Terri tunnels, and Siblingen open clay pit. *Material Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 506, pp. 731-739.
- Maes P. (2002) Circulations de fluids et interactions eau-roches passées et actuelles dans la pile sédimentaire du site de Meuse / Haute-Marne : apport des isotopes du Sr et conséquences. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, Rapport FORPRO 2002/14 Th, 308 p.
- Malama B. & Kulatilake P. (2003) Models for normal deformation under compressive loading. *Int. Journal of Rock Mechanics and mining Sciences*, 40 (2003), pp. 893-901.
- Malow G. & Ewing R.C. (1981) Nuclear waste glasses and volcanic glasses : a comparison of their stabilities. *Scientific Basis for Nuclear Waste Management*, III, pp. 315-322.
- Marty B., Dewonck S. & France-Lanord C. (2003) Geochemical evidence for efficient aquifer isolation over geological timeframes. *Nature*, Vol. 425, pp. 55-58.
- Matray J.-M. & Chery L. (1995) Origins and age of deep waters of the Paris Basin. *Hydrologie et géochimie isotopique*. Ed. Orstom, p. 117-133.
- Mégnién C. (1980) Synthèse géologique du bassin de Paris - 3 volumes. Mémoires du BRGM n°101, 102 et 103.
- Meier P., Trick T., Blümling P. & Volckaert G. (2000) Self-healing of fractures within the EDZ at the Mont Terri rock laboratory : results after one year of experimental work. Proc. of international Workshop on Geomechanics, hydromechanical and thermohydro-mechanical behaviour of deep argillaceous rocks : theory and experiments, October 11-12th 2000, Paris.
- Mercier D. & al. (2004) Sur le Mio-Pliocène du Bassin de Paris. Journée MINANDRA 2004, livre des résumés.
- Michau N. (2005a) ECOCLAY II : Effects of cement on clay barrier performance - Phase II. Final Report. Rapport Andra n° C.RP.ASCM.04.0009.

- Michau N. (2005b) L'évolution chimique des ouvrages d'un stockage à base d'argile gonflante : alvéoles de stockage de déchets C et combustibles usés et scellements de galeries et de puits. Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASCM.03.043.
- Michaux L., Mouche E., Petit J.C. & Fritz B. (1992) Geochemical modelling of the long-term dissolution behaviour of the french nuclear glass R7T7. *Appl. Geochem., Supplementary Issue*, 1, pp. 41-54.
- Mosser-Ruck R. & Cathelineau M. (2004) Expérimental transformation of Na,Ca-smectite under basic conditions at 150°C. *App. Clay Sci.*, 26, pp. 259-273.
- Munier I., Crovisier J.-L., Grambow B., Fritz B. & Clément A. (2004) Modelling the alteration gel composition of simplified borosilicate glasses by precipitation of an ideal solid solution in equilibrium with leachant. *J. Nuclear Mat.*, 324, 2/3, pp. 97-115.
- Nagra (1999a) Diffusion and sorption on hardened cement pastes - experiments and modelling results. Rapport Technique Nagra n° 99-05.
- Nagra (1999b) Geochemistry of natural redox fronts - A review. Rapport Technique Nagra n° 99-05.
- Nagra (2002a) Cementitious near-field sorption data base for performance assessment of an ILW repository in Opalinus Clay. Rapport Technique Nagra n° 02-20.
- Nagra (2002b) Project Opalinus Clay. Safety Report; Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Rapport Nagra n° 02-05.
- Nagra (2003a) Effects of post disposal gas generation in a repository for spent fuel, high level waste and long live intermediate level sited in Opalinus Clay. Rapport Nagra n° 03-10.
- Nagra (2003b) Far-field sorption data bases for performance assessment of a high-level radioactive waste repository in an undisturbed Opalinus clay host rock. Rapport technique Nagra n° TR 02-19.
- Nagra (2003c) Redox conditions in the near field of a repository for SF/HLW and ILW in Opalinus clay. Rapport Technique Nagra n° 02-13.
- Neuzil C.E. (2000) Osmotic generation of " anomalous " fluid pressures in geological environment. *Nature*, vol. 403, pp. 182-184.
- ONDRAF (2001a) Aperçu technique du rapport Safir 2 - Safety Assessment and Feasibility Interim. Rapport ONDRAF n° 2. NIROND 2001-05 F.
- ONDRAF (2001b) Safir 2. Safety Assessment ans Feasibility Interim Report 2. Rapport ONDRAF n° NIROND 2001-06 E.
- Ozanam O. & Su K. (2003) Study of EDZ Cutting-off Solutions for Repository Seals Design. In: *Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories* (Ed. by E. commission), pp. 189-194, Luxembourg, 3 to 5 November 2003.

- Ozanam O. & Su K. (2004) Projet HAVL-Argile. Site de Meuse / Haute-Marne. Etat des connaissances sur l'EDZ : état initial et mécanismes d'évolution. Rapport Andra n° C.RP.ASMG.03.116.
- Panin V.V., Karavaiko G.I. & Pol'kin S.I. (1985) Mechanism and kinetics of bacterial oxidation of sulphide minerals. In : Karavaiko G.I. et Groudev S.N. (Eds) biogeotechnology of metals, Moscou, pp.197-215.
- Pauwels H., Foucher J.-C. & Kloppmann W. (2000) Denitrification and mixing in a schist aquifer: influence on water chemistry and isotopes. *Chem. Geol.*, 168, pp. 307-324.
- Pellenard P., Deconinck, J.F., Marchand D., Thierry J., Fortwengler T. & Vigneron G. (1999) Contrôle géodynamique de la sédimentation argileuse du Callovo-Oxfordien moyen dans l'Est du bassin de Paris: influence eustatique et volcanique. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 328, pp. 807-813.
- Pépin G. & Vialay B. (2004) L'organisation des écoulements dans et autour d'un stockage après resaturation et retour à un état d'équilibre hydraulique - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ACSS.03.0111.
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delayque G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E. & Stievenard M. (1999) Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from vostock ice core, Antarctica. *Nature*, 399, pp. 429-436.
- Podlaha O.G., Mutterlose J. & Veizer J. (1998) Preservation of  $^{18}\text{O}$  and  $^{13}\text{C}$  in belemnite rostra from the Jurassic/early cretaceous successions. *Am. Jr. Sc.*, 298, pp. 324-347.
- Pokrovski G.S., Schott J., Farges F. & Hazemann J.-L. (2003) Iron(III)-silica interactions in aqueous solution: Insights from X-ray absorption fine structure spectroscopy. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 67, N°19, pp. 3559-3573.
- Pomerol C. (1978) Evolution paléogéographique et structurale du bassin de Paris du Précambrien à l'Actuel en relation avec les régions avoisinantes. *Geologie en Mijnbouw*, Vol. 57 (4), pp. 533-543.
- Pourbaix M. (1972) Aspects électrochimiques de la corrosion aqueuse, rapport CEBELCOR RT.204 ; 2ème source : Significance of protection potential in pitting, intergranular corrosion and stress corrosion cracking. *J. of Less-Common Metals*, Vol. 28, pp. 51-65.
- Pytte A.M. & Reynolds R.C. (1989) The thermal transformation of smectite to illite. In The thermal history of sedimentary basins. Ed. N.D. Naeser and T.H. McCulloh -Springer-Verlag, pp.133-140.
- Ramambasoa N. (2001) Etude du comportement hydro-mécanique des argilites - Application au site de Tournemire; Thèse de l'Ecole Polytechnique, 182 p.
- Rebaï S., Philip H. & Taboada A. (1992) Modern tectonic stress field in the méditerrananean region: evidences for variation in stress directions at different scales. *Geophys. J. Int.*, 110, pp. 106-140.

- Revil A. & Leroy P. (2004) Constitutive equations for ionic transport in porous shales. *Journal of Geophysical Research*, Vol.109, B03208, doi :10.1029/2003BJ002755, pp.
- RFS n° III.2.f (10 juin 1991) Règle Fondamentale de Sûreté n° III.2.f relative aux objectifs à retenir dans les phases d'études et de travaux pour le stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde afin d'assurer la sûreté après les périodes d'exploitation du stockage.
- Ribet I., Gin S., Godon N., Jollivet P., Minet Y., Grambow B., Abdelouas A., Ferrand K., Lemmens K., Aertsens M., Pirlet V., Jacques D., Crovisier J.L., Aouad G., Art A., Clément A., Fritz B., Morvan G., Munier I., Del Nero M., Ozgümüs A., Curti E., B. L. & B. S. (2003) GLASTAB Long term behaviour of glass: improving the glass source term and substantiating the basic hypotheses. Reporting Period November 1, 2000, to October 31, 2003. Rapport Final Technical European Commission n° 5th Euratom framework programme 1998 - 2002. Contract N° FIKW-CT-2000-00007.
- Rimstidt J.D. & Vaughan D.J. (2003) Pyrite oxidation: a state-of-the-art assessment of the reaction mechanism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 67, 5, pp. 873-880.
- Rousset D. & Clauer N. (2003) Discrete clay diagenesis in a very low permeable sequence constrained by an isotopic (K-Ar and Rb-Sr) study. *Min. and Petrol.*, 145, pp. 182-198.
- Rutqvist J. & Tsang C.F. (2003) A fully coupled three-dimensional THM analysis of the FEBEX in situ test with the ROCMAS code : prediction of THM behavior in a bentonite barrier. Lawrence Berkeley National laboratory. Paper LBNL-53682.
- RWMC (2002) Development of TRU Waste Disposal Packages - Study on concrete packages - Summary report - for meeting Andra/RWMC (Radioactive Waste Management Funding and Research Center) Tokyo, Japan, nov. 2002.
- Salah S., Gauthier-Lafaye F. & Del Nero M. (2000) Behaviour of U and REE in the weathering sequence of Bangombé, in Oklo Working Group Proceedings of the second EC-CEA workshop on the Oklo-natural analogue Phase II project held in Helsinki, Finland, from 16-18 June 1998, edited by Marevic, H. von and Louvat, D., Nuclear Science and Technology.
- Savage D., Noy D. & Mihara M. (2002) Modelling the interaction of bentonite with hyperalkaline fluids. *Appl. Geochem*, 17, pp. 207-223.
- Scholze H. (1991) Glass : Nature, Structure, and properties. Ed. Springer-Verlag. 454 p.
- Sercombe J., Adenot F., Tiffreau C., Gwinner B. & Felines I. (2004) Modelling of water uptake and salt leaching in bituminized radioactive waste : comparison between numerical, analytical and experimental results. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 807, pp. 377-384.
- SKB (1996) Revisiting Poços de Caldas. Application of the co-precipitation approach to establish realistic solubility limits for performance assessment. Rapport Technique SKB n° 96-04.

- SKB (1999) Experimental determination and chemical modelling of radiolytic processes at the spent fuel/water interface. Rapport SKB Technique n° 99-26.
- SKB (2001) Aspö Hard Rock Laboratory. Report on the installation of the Backfill and Plug Test. Rapport International Progress n° IPR-01-07.
- SKB (2004) Spent fuel performance under repository conditions: a model for use in SR-Can. Rapport SKB Technique n° 04-19.
- Spahiu K., Devoy J., Cui D. & Lundström M. (2004) The reduction of U(VI) by near hydrogen in the presence of UO<sub>2</sub>(s). *Radiochim. Acta*, 92, pp. 597-601.
- Su K. (2003) Development of Hydromechanical Constitutive Models for Callovo-Oxfordian Argilites: the MODEX-REP Project. In: *Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories* (Ed. by E. commission), pp. 299-303, Luxembourg, 3 to 5 November 2003.
- Su K. (2005) Effets d'un stockage sur le comportement mécanique à grande échelle de la couche du Callovo-Oxfordien et des formations géologiques encaissantes - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASMG.04.0046.
- Su K. & Barnichon J.D. (2005) Le comportement mécanique d'alvéoles de stockage de déchets C et de combustibles usés dans le temps - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.RP.ASMG.03.0109.
- Talandier J. (2005) La production et le transfert de gaz dans un stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien - Lien avec le transitoire hydraulique - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASCM.03.0042.
- Taubald H., Bauer A., Schäfer T., Geckeis H., Satir M. & Kim J.L. (2000) Experimental investigation of the effect of high-pH solutions on Opalinus Shale and the Hammerschmiede smectite. *Clay Minerals*, 35, pp. 515-524.
- Techer I., Advocat T., Lancelot J. & Liotard J.-M. (2000) Basaltic glass : alteration mechanisms and analogy with nuclear waste glasses. *Journal of Nuclear Materials*, 282, pp. 40-46.
- Texier D. & Leclerc-Cessac E. (2005) Les biosphères de référence - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.RP.ASMG.03.104.
- Tournassat C. (2003) Interactions cations - argiles : le cas du Fe(II). Application au contexte de stockage profond des déchets radioactifs; Thèse de l'Université J. Fourier, Grenoble I, France, 199 p.
- Trouiller A. & Benabderrahmane H. (2005) Les modèles géologique et hydrogéologique des formations géologiques encaissantes de la couche du Callovo-Oxfordien à l'état initial - Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASMG.03.0108.
- Université de Lyon I (2002) Site de Meuse / Haute-Marne - Modèle sédimentaire de l'Oxfordien calcaire de l'est du bassin de Paris - Intégration des données de terrain à

- l'interprétation lithostratigraphique du traitement géostatistique de la sismique 3D du site. Rapport Andra n° C.RP.0UCB.02.001.
- Valle N. (2001) Traçage isotopique (29Si et 18O) des mécanismes de l'altération du verre de confinement des déchets nucléaires : SON 68. Thèse de l'Université de Lorraine, Nancy, France. 260 p.
- Van Iseghem P. & Sneyers A. (1981) The leaching behaviour of bituminized radioactive waste in the geological disposal conditions of the Boom clay formation. *Mat.Res. Soc. Symp Proc*, Vol. 506, pp. 565-572.
- Vieillard P., Ramirez S., Bouchet A., Cassagnabère A., Meunier A. & Jacquot E. (2004) Alteration of the Callovo-Oxfordian Clay from Meuse / Haute-Marne underground laboratory (France) by alkaline solutions : II. Modelling of mineral reactions. *Applied Geochemistry*, 19, pp. 1699-1709.
- Vigeneron G., Delay J., Distinguin M., Lebon P. & Trouiller A. (2004) Apport des investigations multi-échelles pour la construction d'un modèle conceptuel des plateformes carbonatées de l'Oxfordien moyen et supérieur de l'Est du Bassin de Paris. 11èmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'AIH - Journées thématiques de l'AGBP. Géologie et hydrogéologie du bassin de Paris. Avancées et perspectives. 16-17 novembre 2004. Actes du Colloque pp.55-62.
- Villemin T. (1986) La chronologie des évènements tectoniques dans le Nord-Est de la France et le Sud-Ouest de l'Allemagne du Permien à l'Actuel. *C.R.Ac.Sc.*, 303, 18, pp. 1685-1690.
- Vincent B. (2001) Sédimentologie et géochimie de la diagenèse des carbonates. Thèse Université de Bourgogne, Dijon, France, 324 p.
- Wei H.F., Ledoux E. & De Marsily G. (1990) Regional modelling of groundwater flow and salt and environmental tracer transport in deep aquifers in the Paris basin. *Journal of Hydrology*, 120, pp. 351-358.
- Wendling J. (2005) Le transitoire hydraulique d'un stockage : décharge, désaturation-resaturation, retour à un état d'équilibre hydraulique. Site de Meuse / Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASIT.03.117.
- Whittaker B., Singh R. & Sung G. (1992) Rock fracture Mechanics principles, design and applications. Developments in geotechnical engineering. Elsevier Ed., 71, p. 116-127.
- Worden R.H., Coleman M.L. & Matray J.-M. (1999) Basin scale evolution of formation waters : a diagenetic and formation water study of the triassic Chaunoy formation, Paris Basin. *Cosmochim. Actae*, 63(17), pp. 2513-2528.
- Worden R.H. & Matray J.M.-M. (1995) Cross formational flow in the Paris basin. *Basin Res.*, 7, pp. 53-66.
- Wright A.C. (1994) Neutron scattering from vitreous silica. V. The structure of vitreous silica : what have we learned from 60 years of diffraction studies ? *J. Non-Crist. Solids*, 179, pp. 84-115.

Zachariensen W.H. (1932) The atomic arrangement in glass. *J. Am. Chem. Soc.*, 54, pp. 3841-3851.

Zachariensen W.H. (1933) Die Struktur der Gläser. *Glastech. Ber. -Glass Sci. Technol.*, 11, 4, pp. 120-123.

Zarzycki J. (1982) Les verres et l'état vitreux. Ed. Masson, 391 p.

Zhang C.L. & Rothfuchs T. (2004) Experimental study of the Hydro-mechanical behaviour of the Callovo-Oxfordian argillite. *Applied Clay Science*, 26, pp. 325-336.