

Dossier
2005
Granite

Sommaire

Introduction

p.04 > **Intérêt des formations granitiques pour le stockage géologique**

Chapitre 1

p.11 > **Les colis**

Chapitre 2

p.29 > **L'étude de la conception d'un stockage en milieu granitique**

Chapitre 3

p.51 > **Comprendre et modéliser le granite**

Chapitre 4

p.83 > **Description des concepts de stockage en milieu granitique**

Chapitre 5

p.113 > **Le long terme et la sûreté**

p.150 > **Conclusion**

Introduction

I. L'évaluation de la faisabilité d'un stockage géologique de déchets HAVL : le cadre des recherches menées par l'Andra

I.1 La loi du 30 décembre 1991

La loi du 30 décembre 1991 sur la gestion des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue (HAVL), reprise dans l'article L542 du Code de l'environnement, a confié à l'Andra, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, la mission d'évaluer la possibilité d'un stockage des déchets en formation géologique profonde, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains (axe 2 de la loi). Par la suite, le gouvernement a demandé à l'Andra d'inscrire ses travaux dans une logique de réversibilité. De son côté, le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) pilote les travaux relatifs à la séparation et à la transmutation des déchets HAVL (axe 1 de la loi) ainsi qu'à leur entreposage et à leur conditionnement (axe 3).

Dans ce cadre, des recherches ont été conduites, avec des outils et à des degrés de maturité différents, sur deux types de milieu géologique : l'argile et le granite. Le présent rapport constitue une synthèse des travaux de l'Andra pour l'étude du stockage géologique en milieu granitique. Un autre rapport détaille les acquis pour la formation argileuse du site de Meuse/Haute-Marne.

La loi de décembre 1991 institue une Commission nationale d'évaluation (CNE), instance indépendante composée d'experts scientifiques français et étrangers, qui examine en continu les recherches conduites par le CEA et l'Andra et publie chaque année un rapport d'évaluation. La loi prévoit que le gouvernement adresse au Parlement un rapport global d'évaluation des recherches, préparé par la CNE, afin d'éclairer le débat parlementaire en 2006.

Depuis 1996, le ministère de la recherche coordonne l'élaboration, la mise en œuvre et le suivi de la stratégie et des programmes de recherches menés par l'Andra et le CEA. L'Autorité de sûreté nucléaire et son appui technique, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), ont également examiné les résultats des recherches sous l'angle de la sûreté.

La loi de 1991 énonce les grands principes à prendre en compte dans les recherches, en particulier la nécessité de travailler dans « *le respect de la protection de la nature, de l'environnement et de la santé* » et de « *prendre en considération le droit des générations futures* ». Il s'agit en particulier de ne pas leur léguer un problème sans solution tout en leur permettant de conserver la maîtrise du processus engagé.

La mission de l'Andra

Elle recouvre :

- *un rôle global d'agence de programme* qui oriente les recherches et anime la communauté scientifique et technique intervenant dans ce domaine,
- *l'évaluation de la faisabilité d'un éventuel stockage en profondeur dans une logique de réversibilité, à partir notamment des recherches menées en laboratoire souterrain.* Pour le granite, l'Agence ne dispose pas à ce jour de laboratoire souterrain mais bénéficie des apports des laboratoires étrangers (Åspö en Suède, Grimsel en Suisse) et poursuit ses travaux pour évaluer les potentialités des granites français. Pour le milieu argileux, l'Andra dispose du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, créé par le décret d'août 1999, ainsi que de laboratoires étrangers.

I.2 La Règle fondamentale de sûreté (RFS III.2.f.)

L'Autorité de sûreté nucléaire a émis en 1991 une Règle fondamentale de sûreté (RFS III.2.f.) qui fournit un cadre précisant les attentes en matière de sûreté à long terme vis-à-vis du stockage, les principes de conception, les critères de sélection de milieux géologiques propices et les modalités d'étude.

Elle énonce les objectifs fondamentaux qui doivent guider les travaux sur le stockage : protection de l'homme et de l'environnement contre les atteintes éventuelles liées aux déchets radioactifs, limitation à un niveau aussi faible que raisonnablement possible de l'impact radiologique éventuel d'un stockage, et précise que le stockage doit être constitué de plusieurs barrières : les colis abritant les déchets, la barrière ouvragée (composants et matériaux entre le colis et le milieu géologique), le milieu géologique lui-même.

La RFS énonce les grandes attentes par rapport à un site d'étude : stabilité géodynamique à long terme (en particulier absence de risque sismique notable), absence de circulation d'eau importante dans le milieu géologique, propriétés mécaniques des roches pour permettre le creusement des installations, propriétés de confinement du milieu vis-à-vis des radionucléides, profondeur suffisante pour mettre les déchets à l'abri des agressions diverses, absence de ressources rares exploitables à proximité.

II. Le programme de recherches de l'Andra sur le stockage en formation granitique

II.1 Une démarche d'étude géologique à caractère générique

Avec l'argile, le granite est l'une des formations géologiques étudiées par l'Andra dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991.

En l'absence de site de laboratoire, les études sur le milieu granitique n'ont pas visé évaluer la faisabilité d'un stockage qui serait conçu pour répondre aux spécificités d'un site particulier. Le programme de recherches a eu pour objectif d'évaluer l'intérêt du milieu granitique pour un stockage. Dans cette perspective, l'Andra a identifié et traité les grandes problématiques relatives au stockage en milieu granitique pour vérifier qu'aucune ne présente de caractère rédhibitoire et pour examiner les options techniques possibles.

La démarche a consisté à étudier la conception d'architectures génériques de stockage, fondées sur les propriétés du milieu granitique. Les options proposées ont servi de base aux analyses relatives à la compréhension du comportement d'un stockage à long terme et aux évaluations de sûreté.

Études granitiques : quelques repères depuis 1991

Dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991, l'Andra a effectué, de 1994 à 1996, des travaux de reconnaissance en vue d'implanter un laboratoire souterrain dans le sud du département de la Vienne. Le massif granitique sélectionné était un granite sous couverture sédimentaire, délimité à partir de données géophysiques et géologiques.

Dans son rapport de 1997, la Commission nationale d'évaluation émettait un avis négatif sur le site de la Vienne, notamment vis-à-vis des risques de circulation de fluides entre le granite et les aquifères exploités dans la couverture sédimentaire ; elle soulignait l'intérêt de granites « affleurants » qui auraient des caractéristiques plus favorables.

Dans ses décisions du 9 décembre 1998, le gouvernement ne retenait pas le site de la Vienne et engageait des recherches afin de trouver un autre site pour un laboratoire de recherche en milieu granitique. Une mission de concertation était nommée en 1999 pour présenter ce projet et recueillir les avis des populations sur quinze sites sélectionnés sur la base de critères géologiques. L'identification de ces quinze sites, soumise à un comité d'experts nationaux et internationaux, résultait à la fois des démarches de sélection antérieures et de l'avancée des connaissances sur le milieu granitique en France et à l'étranger. En juillet 2000, le rapport de la mission mettait en lumière l'échec de la concertation.

Pour répondre aux orientations du gouvernement, l'Andra a conçu en 2000 un programme de recherche valorisant les données acquises dans les laboratoires souterrains étrangers et dans des contextes géologiques variés.

Les différences de contexte pour les études relatives aux deux formations argile et granite ont conduit l'Andra à organiser ses recherches en deux projets distincts : le projet d'étude du stockage en milieu argileux, s'appuyant sur le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, et le projet pour l'étude du stockage en milieu granitique.

Certaines études, notamment relatives aux colis de déchets et aux matériaux, ont été communes aux deux projets, les résultats étant exploités de manière spécifique par chacun des projets.

Dans ce contexte, le Dossier 2002 Granite a dressé en 2002 un premier bilan des études et recherches sur la possibilité d'un stockage en milieu granitique.

Le présent rapport tire les conclusions des nombreuses études réalisées depuis 1991. Sur cette base, il vise à évaluer l'intérêt du milieu granitique pour un stockage de déchets à haute activité et à vie longue.

Dans cette logique, le programme de recherche s'organise autour de quatre domaines d'études complémentaires :

- *L'étude du milieu granitique*

La conception générique d'un stockage s'appuie sur les propriétés du granite. Les recherches ont comporté des études générales visant à comprendre et modéliser le milieu granitique, ainsi qu'une analyse de la variabilité des caractéristiques des granites français pour pouvoir adapter les études de conception et mener les évaluations et les analyses de sûreté.

- *La conception générique d'un stockage en milieu granitique*

À partir de principes de conception fondés sur la sûreté, les études ont proposé des conditionnements de déchets, des architectures génériques de stockage, des modes d'exploitation et de fermeture du stockage prenant en compte la réversibilité.

- *Le comportement du stockage et son évolution à long terme*

Sur la base des options proposées, les études ont analysé le comportement à long terme du stockage pour comprendre et modéliser les phénomènes thermiques, mécaniques, chimiques et hydrauliques intervenant dans un stockage en milieu granitique.

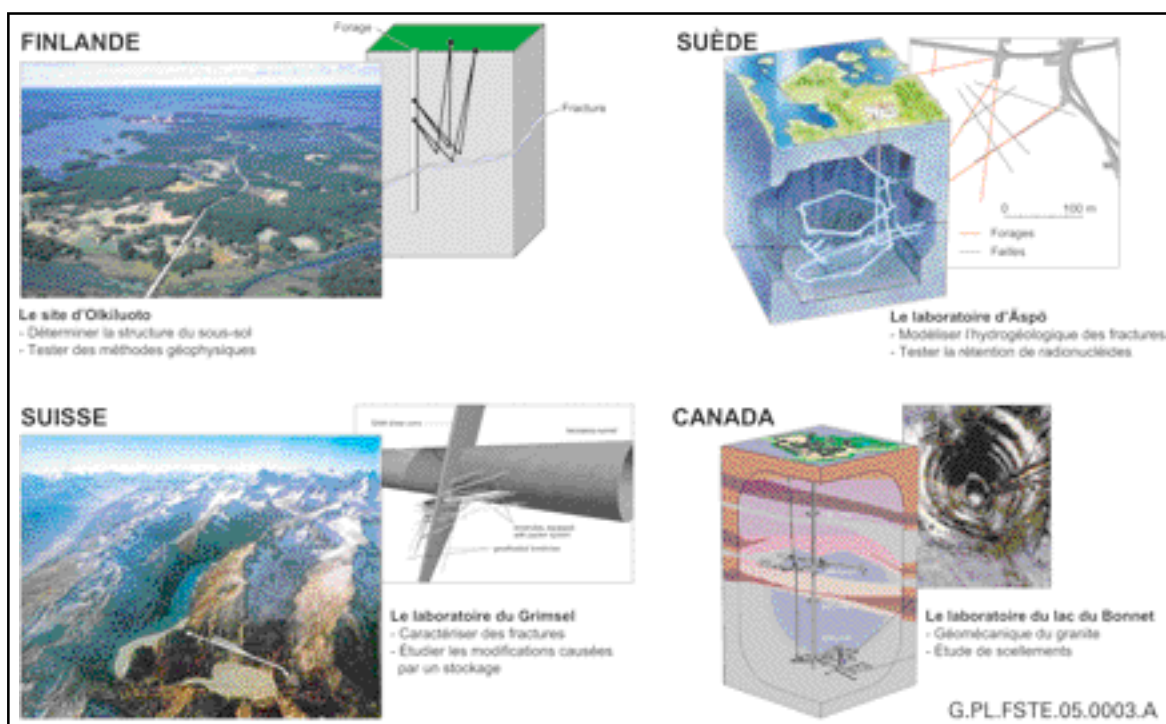
- *Les analyses de sûreté à long terme*

Dans le contexte d'études à caractère générique, les analyses de sûreté n'ont pas visé à évaluer la performance d'un stockage sur un ou des site(s) granitique(s) particulier(s) : elles ont identifié les paramètres importants pour la performance d'un stockage en milieu granitique par rapport à l'objectif de protection de l'homme et de son environnement, et apprécié la robustesse des options de conception proposées.

II.2 L'appui de la coopération internationale et la mobilisation de la communauté scientifique nationale

L'Andra s'est largement appuyée sur les études menées à l'étranger et a participé activement aux programmes d'expérimentations effectués dans les laboratoires souterrains de Suède, de Suisse et du Canada.

Les principaux thèmes de coopération ont concerné l'étude du milieu granitique : structuration et fracturation d'un massif granitique, méthodes de reconnaissance, écoulements naturels d'eau en profondeur, capacité de rétention des radionucléides dans la roche...



Exemples d'expérimentations en coopération avec des partenaires étrangers

Les études de conception d'un stockage se sont également appuyées sur des éléments de démonstration, acquis en laboratoires souterrains, relatifs à la mise en œuvre et au comportement des composants ouvrages d'un stockage : scellements, remblais, barrière ouvragée...

Enfin, la démarche d'études a bénéficié du retour d'expérience acquise à l'étranger pour l'analyse de sûreté d'un stockage en milieu granitique, notamment en Suède et en Finlande.

Cette démarche a ainsi mis à profit l'important acquis, au niveau international, sur les études du stockage en milieu granitique.

L'Andra a également mis en place des partenariats scientifiques au niveau national (CEA, BRGM, GdR Forpro du CNRS, École des Mines de Paris). Outre la participation d'équipes de recherche françaises aux programmes étrangers, ceci a répondu au souci de ne pas transposer au contexte géologique français des résultats obtenus à l'étranger, sans un examen de la pertinence scientifique et technique d'une telle démarche.

II.2.1 La portée de la démarche

Sans site spécifique d'études, la démarche retenue par l'Andra a permis, sur la base notamment des nombreuses données acquises à l'étranger, d'instruire les différents aspects à prendre en compte dans la conception d'un stockage et dans son évaluation. Elle a conduit à proposer des concepts de stockage « génériques », susceptibles d'assurer, dans le contexte géologique français, l'adéquation d'un stockage aux objectifs de sûreté à long terme.

Cette démarche ne prétend cependant pas tirer les mêmes conclusions qu'une démarche sous-tendue par des travaux de reconnaissance d'un site granitique en surface, puis en laboratoire souterrain. Seuls de tels travaux permettraient de connaître suffisamment les propriétés d'un granite pour en tirer une juste évaluation sur la faisabilité d'un stockage.

Les caractéristiques spécifiques d'un site amèneraient en effet à ajuster la conception des composants du stockage aux propriétés du granite étudié, à adapter son architecture à la structure du massif, à préciser l'organisation de sa construction et de son exploitation et à évaluer avec exactitude les options retenues vis-à-vis des objectifs de sûreté à long terme.

II.2.2 La structure du Dossier 2005

Le Dossier 2005 comprend d'une part la présentation, sous forme de « référentiels », des connaissances qui sous-tendent la conception d'un stockage et son analyse, d'autre part la synthèse en trois « tomes » des options de conception proposées et des analyses scientifiques et de sûreté associées.

• Des « référentiels de connaissances »

L'Andra a structuré l'acquisition des connaissances autour de référentiels. Trois sont communs avec le dossier « argile » :

- référentiel des matériaux d'un stockage qui regroupe les données relatives au comportement des matériaux (aciers, bétons, etc.) autres que la roche de la formation d'accueil du stockage,
- référentiel de comportement des colis de déchets à haute activité et à vie longue, qui synthétise les connaissances et modèles sur le comportement des déchets en environnement de stockage,
- référentiel de connaissance et modèle d'inventaire et de dimensionnement, qui recense tous les déchets HAVL produits et à produire par les installations nucléaires existantes.

Un quatrième référentiel spécifique au milieu granitique rassemble, sous forme d'une analyse typologique, les données disponibles sur les granites français.

• Trois « tomes »

Trois tomes font la synthèse des acquis dans la perspective de chacun des domaines du programme d'études :

- un tome « Architecture et gestion du stockage géologique »

L'Andra propose des options génériques d'architectures de stockage à la fois possibles au regard des attentes, notamment sûreté et réversibilité, et réalistes d'un point de vue industriel. Fondées sur les connaissances et la technologie disponibles, les options techniques étudiées, choisies aussi simples et robustes que possible, montrent que des solutions existent pour un stockage en milieu granitique.

Ces options ont constitué la base sur laquelle a été analysée la sûreté du stockage, notamment son comportement et son évolution aux différentes échelles de temps. Cette analyse fait l'objet des deux autres tomes du dossier.

- un tome « Evolution phénoménologique du stockage géologique »

La conception et l'évaluation de sûreté d'un stockage reposent sur la compréhension de son évolution phénoménologique et de celle de son environnement qui permet de rendre compte, *in fine*, des processus conditionnant ou contrôlant le comportement et la migration des radionucléides dans l'environnement à l'échelle du million d'années.

Ce tome présente le corpus de connaissances acquises sur le milieu granitique et sur la phénoménologie d'un stockage.

- un tome « Analyse de sûreté du stockage géologique »

Ce tome décrit la démarche d'analyse de la sûreté d'un stockage en milieu granitique dans un contexte d'études génériques.



Dossier 2005 Granite

Les colis

1

p.12 > **1. Les déchets de haute activité et à vie longue**

p.16 > **2. Le modèle d'inventaire**

p.24 > **3. Le comportement à long terme des colis**

Les colis

L'étude de faisabilité d'un stockage de déchets de haute activité et à vie longue, sa conception et l'évaluation de sa sûreté reposent sur la connaissance des colis :

- nombre, typologie, caractéristiques des colis actuels et futurs,
- comportement phénoménologique à long terme en situation de stockage, en particulier relâchement éventuel de radionucléides.

1. Les déchets de haute activité et à vie longue

1.1 Les déchets radioactifs

Les déchets radioactifs sont classés en France en fonction de leur activité (très faible, faible, moyenne, haute), c'est-à-dire l'intensité du rayonnement émis, et de la période de décroissance (vie courte ou moyenne d'une part, vie longue d'autre part) des principaux radionucléides qu'ils renferment. Cela permet de définir la durée de leur nuisance potentielle. Les modes de gestion des déchets doivent être adaptés à cette nuisance.

Activité \ Période	Période courte (VC) < 30 ans	Période longue (VL) > 30 ans
Très Faible Activité (TFA)	Centre de stockage TFA de l'Aube (hors résidus miniers stockés sur site)	
Faible Activité (FA)	Centre de stockage FMA de l'Aube	Projet d'implantation d'un centre de stockage radifères / graphites
Moyenne Activité (MA)		
Haute Activité (HA)	Recherches menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991	

Classification des déchets radioactifs

Les rayonnements ionisants émis par les radionucléides à vie courte (ou moyenne) sont surtout constitués de particules β et de photons γ , alors que ceux émis par les radionucléides à vie longue comportent en particulier des particules α .

Pour protéger les personnes d'une activité élevée associée à des radionucléides à vie courte, il faut interposer un écran de protection assez épais pour arrêter les rayonnements β , et surtout γ (une épaisseur métrique de béton pour les déchets de plus haute activité) ; il faut aussi confiner les radionucléides pendant une durée en rapport avec leur période radioactive.

Pour les radionucléides à vie longue, la problématique porte sur la limitation de leur dissémination, principalement pour s'opposer à une ingestion ou une inhalation qui exposerait l'organisme au rayonnement α . Lorsque l'activité des déchets est significative, ce confinement doit alors être assuré sur de très longues durées.

Décroissance radioactive, période et types de rayonnements

Un isotope radioactif d'un élément est physiquement instable du fait d'un excès de protons ou de neutrons dans son noyau. Ce dernier peut se transformer spontanément en un autre noyau, stable ou encore radioactif : cette transformation irréversible, ou désintégration, s'accompagne de l'émission d'une particule alpha (noyau d'hélium comprenant deux protons et deux neutrons) ou bêta (électron ou positon), ainsi que d'un photon gamma. La désintégration radioactive d'un noyau donné est un phénomène aléatoire dans le temps. On peut cependant définir pour chaque isotope radioactif une période (ou demi-vie) qui est la durée nécessaire à la désintégration de 50 % de la quantité initialement présente. Ainsi, la période radioactive de l'isotope 14 du carbone (^{14}C) est de 5730 ans. Au fur et à mesure des désintégrations, il reste une quantité de moins en moins importante d'isotopes radioactifs. Cette diminution progressive de la radioactivité est appelée décroissance radioactive. Après une durée de n périodes d'un isotope radioactif, celui-ci aura décréu de $1/2^n$ par rapport à l'inventaire initial ; ainsi, après dix périodes, il ne reste plus qu'un millième environ de la matière radioactive initiale.

On distingue trois types de rayonnements :

- *Alpha* (α) : émission de particules composées de noyaux d'atomes d'hélium peu pénétrants (portée dans l'air de quelques centimètres). Ces particules sont arrêtées par une feuille de papier.
- *Bêta* (β) : électrons qui pénètrent de plusieurs mètres. Une feuille d'aluminium ou une vitre en verre les arrêtent.
- *Gamma* (γ) : rayonnement électromagnétique beaucoup plus pénétrant, de même nature que les rayons X. Plusieurs centimètres de plomb ou plusieurs décimètres de béton sont nécessaires pour l'arrêter.

1.2 Les déchets de haute activité et à vie longue

1.2.1 Nature et provenance

Les déchets de haute activité et à vie longue, qui représentent 5 % environ du volume des déchets radioactifs produits actuellement en France, contiennent : des radionucléides à vie courte ou moyenne en quantité importante (induisant une haute activité) et des radionucléides à vie longue en quantité moyennement à très importante.



Hall d'entreposage actuel de déchets C

Les principaux secteurs d'activité concourant à la production de ces déchets sont l'industrie électronucléaire (réacteurs de production d'électricité d'EDF, usines COGEMA de La Hague et Marcoule de traitement des combustibles) ainsi que les activités de recherche et de la défense nationale (centres CEA). Aux résidus du traitement des combustibles usés s'ajoutent les déchets d'exploitation et de maintenance des usines de traitement et des réacteurs nucléaires.

Les combustibles usés déchargés des réacteurs d'EDF sont traités dans les usines COGEMA de La Hague. Le traitement vise à séparer l'uranium et le plutonium, qui ne sont pas considérés comme des déchets, des déchets eux-mêmes : produits de fission, produits d'activation, actinides mineurs conditionnés dans les usines de La Hague¹. A ces résidus de haute activité s'ajoutent les matériaux, essentiellement métalliques, des assemblages combustibles ainsi que les déchets de moyenne activité liés à l'exploitation et à la maintenance des usines de traitement (effluents liquides, etc.). De leur côté, l'uranium et le plutonium récupérés entrent dans la fabrication des combustibles MOX (oxyde d'uranium et plutonium) et URE (uranium de retraitement). Après utilisation en réacteurs, ces derniers sont entreposés dans l'attente de leur traitement, selon la stratégie industrielle de gestion de l'aval du cycle indiquée par EDF.

L'exploitation des réacteurs nucléaires engendre aussi des déchets de moyenne activité : il s'agit de dispositifs de démarrage et de pilotage des réacteurs qui, après une certaine durée d'utilisation, sont remplacés et deviennent alors des déchets. Ils sont actuellement entreposés à proximité des réacteurs.

Les déchets à vie longue issus d'activités autres que la production électronucléaire (recherche, défense) sont en général des déchets technologiques de moyenne activité : pièces remplacées ou obsolètes, contaminées par les matières et déchets radioactifs traités... On note aussi l'existence d'une petite quantité de combustibles usés issus de réacteurs de recherche ou militaires, pour laquelle l'éventualité d'un stockage est étudiée.

1.2.2 Deux catégories de déchets

1.2.2.1 Les déchets de haute activité (ou déchets vitrifiés), également appelés déchets C



Ils représentent 1 % en volume des déchets radioactifs et correspondent aux matières non valorisables contenues dans les solutions issues du traitement des combustibles usés dans les usines de COGEMA : produits de fission, actinides mineurs, produits d'activation.

Leur haute activité β - γ induit *un dégagement thermique important* qui diminue dans le temps, principalement avec la décroissance radioactive des produits de fission à période moyenne (césium 137, strontium 90).

Ils sont aujourd'hui incorporés dans une matrice en verre borosilicaté (verre R7T7) dont la capacité de confinement est particulièrement élevée et durable (plusieurs centaines de milliers d'années) lorsqu'elle se trouve dans des conditions d'environnement physico-chimiques favorables. Les radionucléides se trouvent ainsi répartis de manière homogène dans la matrice vitreuse. Ces déchets vitrifiés sont coulés dans des fûts en inox pour constituer les colis primaires de déchets vitrifiés C.

Conteneur standard de déchets vitrifiés (CSD-V)

¹ Les usines UP2-400 La Hague et UP1 Marcoule, aujourd'hui arrêtées, ont traité des combustibles des filières graphite-gaz et à neutrons rapides. Les solutions de produits de fission ont été conditionnées par vitrification ; quant aux boues d'effluents, elles ont été conditionnées dans un enrobé de bitume à Marcoule.

Les radionucléides produits en réacteur

Ils sont de trois types :

- *les produits de fission* sont issus directement de la fission des atomes d'uranium et de plutonium : césium, strontium, iode, technétium..., ou de la désintégration des fragments de fission. *Le césium 137 (et son descendant le barium 137) et le strontium 90 (et son descendant l'yttrium 90) sont à l'origine de l'essentiel du rayonnement et du dégagement thermique des déchets HAVL, importants au cours des 300 premières années* compte tenu de leur période de 30 ans,
- *les actinides* sont des éléments naturels ou artificiels dont le noyau compte un nombre de protons supérieur ou égal à 89. Quatre actinides existent à l'état naturel : actinium, thorium, protactinium, uranium. Les actinides mineurs (principalement américium, curium, neptunium) sont formés dans un réacteur par captures successives de neutrons à partir des noyaux du combustible. *Leur radioactivité et leur puissance thermique décroissent lentement.* Après la décroissance des produits de fission à période moyenne, les déchets présentent un dégagement thermique résiduel qui résulte de l'activité de l'américium 241 qui, à son tour, décroît progressivement,
- *les produits d'activation* sont formés par capture de neutrons principalement dans les matériaux de gainage et de structure du combustible. Leur radioactivité est sensiblement inférieure à celle des produits de fission et actinides mineurs mais doit être prise en compte car certains de ces radionucléides ont une longue période radioactive.

1.2.2.2 Les déchets de moyenne activité à vie longue également appelés déchets B

Ils proviennent surtout des usines de fabrication et de traitement des combustibles nucléaires ainsi que des centres de recherche. De ce fait, ils recouvrent des objets très divers, par exemple : éléments de structure des assemblages combustibles (gaines des crayons de combustibles appelées « coques », pièces d'extrémité appelées « embouts », grilles de maintien des assemblages...), boues de traitement des effluents, matériels divers (filtres, pompes...). Ce sont, pour l'essentiel, des métaux, mais on y trouve aussi des composés inorganiques et organiques (plastiques, cellulose...).



Conteneur standard de déchets compactés (CSD-C)



Conteneur béton fibres cylindrique (déchets technologiques)

Leur activité β - γ est faible ou moyenne ; aussi ne présentent-ils pas ou peu de dégagement thermique. Mais leur contenu en éléments à vie longue justifie, comme pour les déchets C, un confinement de très longue durée.

Suivant leur nature, *ils sont conditionnés dans du bitume* (pour les boues issues du traitement des effluents), *dans du béton ou par compactage* (pour les coques et embouts et les déchets technologiques). Les déchets ainsi conditionnés sont placés dans des fûts en béton ou en acier. Les colis obtenus constituent les colis primaires de déchets B, à la fois les plus nombreux et les plus divers par leurs conditionnements.

Le dégagement thermique des colis de déchets

Les radionucléides contenus dans les déchets émettent des rayonnements β, γ et α qui sont partiellement ou totalement ralentis au sein des déchets et/ou de leurs matrices de conditionnement, en particulier le verre. De ce fait, ils perdent tout ou partie de leur énergie cinétique qui est alors transformée en chaleur.

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

L'effet thermique correspond, pour l'essentiel, à des radionucléides de vie courte (cobalt 60) à moyenne (césium 137 dont la période est de 30 ans). Ainsi, le dégagement thermique des colis de déchets est surtout important durant les premières dizaines à quelques centaines d'années au maximum après la fabrication des colis. Au-delà de cette période, les émetteurs β, γ sont en quantité plus faible ; le dégagement thermique des colis est alors principalement dû aux émetteurs α , mais la chaleur émise est plus faible.

2. Le modèle d'inventaire

2.1 Recenser l'existant et les productions futures du parc actuel

2.1.1 Un modèle d'inventaire des déchets existants et futurs pour les études du stockage

Pour étudier la faisabilité d'un stockage, l'Andra a établi, en étroite collaboration avec les producteurs de déchets, un modèle d'inventaire des déchets HAVL qui prend en compte *les déchets déjà produits*, entreposés, sous forme conditionnée ou non, sur les sites de production, ainsi que *les déchets à produire par les installations électronucléaires actuelles*. Ce modèle d'inventaire de dimensionnement (MID) donne une enveloppe des volumes et natures de déchets qui pourraient faire l'objet d'un stockage, pour permettre l'étude de sa faisabilité avec des marges de dimensionnement.

Il se réfère à *des déchets sous une forme conditionnée*. Cela implique de connaître ou de formuler des hypothèses sur la nature et les modes de conditionnement des déchets existants non encore conditionnés et des déchets futurs. Ces hypothèses reconduisent les procédés industriels actuellement mis en œuvre par les producteurs : vitrification, compactage, cimentation, bitumage.

Le *recensement des déchets existants* s'appuie sur la connaissance des processus engendrant des déchets et effluents radioactifs, les bilans de production de déchets que chaque installation effectue périodiquement, l'identification des lieux d'entreposage des déchets produits et la maîtrise de leur contenu.

Pour les productions futures, le modèle d'inventaire se fonde sur des hypothèses de production et de conditionnement de déchets, en particulier sur des scénarios de gestion du parc électronucléaire élaborés avec les producteurs de déchets (EDF, CEA, COGEMA).

2.1.2 La prise en compte des combustibles usés

Les combustibles usés ne sont pas considérés comme des déchets. Néanmoins, afin d'explorer les problématiques spécifiques qu'ils poseraient vis-à-vis des techniques de gestion, certains scénarios d'études prennent en compte des combustibles usés issus des réacteurs nucléaires d'EDF ou du CEA dans une hypothèse où ils ne seraient pas traités. Les combustibles usés contiennent les radionucléides liés aux réactions de

fission (plutonium, actinides mineurs, produits de fission) et présentent une haute activité qui se traduit par un dégagement thermique notable. Ce dégagement thermique est dû à leur contenu en produits de fission à période moyenne, en plutonium et en américium (issu principalement de la décroissance du plutonium) ; ces deux derniers éléments conduisent à une décroissance plus lente dans le temps. Autres caractéristiques des combustibles usés : leurs grandes dimensions et leur contenu plus important en matière fissile (uranium et plutonium) qui induit un risque de criticité.



Assemblages de combustibles usés

Un assemblage de combustibles usés est constitué de crayons en alliage de zirconium contenant les pastilles de combustible d'oxyde d'uranium (UO_2) ou d'oxyde mixte uranium-plutonium (UO_2 -Pu), selon qu'il s'agit de combustibles UOX ou MOX. Ces crayons (4 à 5 m de long) sont fermés à leurs extrémités par deux bouchons soudés. Le maintien axial de chaque empilement de pastilles est assuré par un ressort hélicoïdal en partie haute. Les crayons sont maintenus en place par une série de grilles métalliques et un dispositif en partie haute permet la manutention de l'assemblage.

Piscine de refroidissement de combustibles usés

2.1.3 Quatre scénarios pour situer les ordres de grandeur

Quatre scénarios d'étude ont été définis avec les producteurs pour situer les ordres de grandeur des déchets HAVL qui seront produits dans le futur par le parc actuel d'EDF. Ils reposent sur trois hypothèses communes concernant le parc électronucléaire actuel (58 réacteurs) : une production cumulée d'électricité de 16 000 térawatts-heures (TWh), une durée de vie moyenne des réacteurs de 40 ans, un taux de combustion moyen des combustibles déchargés². Ces hypothèses conduisent, pour le parc existant d'EDF, à une quantité totale de combustibles déchargés de 45 000 tonnes de métal lourd (tML).

L'objectif de ces scénarios n'est pas de préfigurer un schéma industriel mais d'examiner comment une architecture de stockage pourrait s'adapter à différentes gestions de l'aval du cycle électronucléaire. Le principe retenu est d'encadrer des stratégies industrielles possibles, sans chercher à privilégier l'une ou l'autre.

² Les taux de combustion moyens sont les suivants : URE 45 GWj/tML, UOX1 33 GWj/tML, UOX2 45 GWj/tML, UOX3 55 GWj/tML, MOX 48 GWj/tML.

Les quatre scénarios

- **Le scénario S1a** suppose le traitement de tous les CU déchargés par le parc EDF actuel (45 000 tML, dont 8 000 tML d'UOX1, 20 500 tML d'UOX2, 13 000 tML d'UOX3, 800 tML d'URE et 2 700 tML de MOX).
- Dans **les scénarios S1b et S1c**, les 42300 tML d'UOX/URE sont traités. En revanche, les combustibles usés MOX (2700 tML) sont supposés non traités et la faisabilité de leur stockage direct est évaluée. Dans le scénario S1b, les colis de déchets vitrifiés ont une puissance thermique supérieure aux colis actuels. Dans le scénario S1c, leur puissance thermique est équivalente.
- **Le scénario S2** a été introduit pour analyser la faisabilité du stockage direct de combustibles usés UOX et MOX. Il table sur le traitement partiel des CU UOX jusqu'en 2010 (8 000 tML d'UOX1 et 8 000 tML d'UOX2), puis sur un stockage direct de 29 000 tML avec 12 500 tML d'UOX2, 14 000 tML d'UOX3, 500 tML d'URE et 2 000 tML de MOX.

2.2 Les colis types du modèle d'inventaire

2.2.1 La prise en compte de la diversité des colis actuels et futurs dans des options de stockage standardisées

Le recensement des déchets et la définition de leur mode de conditionnement ont conduit à une variété importante de familles de colis primaires (61 au total) de déchets HAVL qui diffèrent par leur contenu radiologique, leur dégagement thermique, la nature physico-chimique de leurs déchets ou matériaux de conditionnement, leurs dimensions et leurs quantités.

Pour que les études de stockage couvrent toutes ces familles de colis, le modèle d'inventaire regroupe les familles en un nombre plus limité de « colis types » représentatifs afin de pouvoir :

- approfondir les études scientifiques et techniques en limitant le nombre de cas à traiter de manière spécifique, sans toutefois négliger la diversité des colis,
- proposer une standardisation des ouvrages et des moyens qui seraient mis en œuvre dans une installation de stockage.

Cette démarche a permis de présenter un concept de stockage pour chacun des colis inventoriés.

Chaque colis type du modèle d'inventaire correspond à des caractéristiques couvrant un nombre plus ou moins important de colis primaires relevant de différentes familles, ce qui facilite les études.

(Légende du tableau ci-contre)

- **Au niveau 1**, les principaux colis types sont différenciés suivant :
 - la nature de leur contenu (déchets d'exploitation des réacteurs, boues de traitement d'effluents, déchets technologiques, déchets de structure d'assemblages combustibles, sources, déchets au radium, déchets de haute activité du traitement des combustibles, combustibles usés le cas échéant),
 - leur niveau de dégagement thermique (déchets B, déchets C, et CU),
 - leurs modes de conditionnement (compactage, bitumage, cimentation, vitrification, mise en conteneur). Plusieurs colis types de déchets C vitrifiés sont définis pour séparer les productions de verres anciennes (C0), actuelles (C1) et potentielles dans le futur (C2, C3 et C4). Cette distinction restitue en particulier la variabilité de la composition chimique du verre, de la puissance thermique et des dimensions des colis.
- **Aux niveaux 2 et 3**, les colis types décrivent plus finement, pour les besoins d'études détaillées, la variabilité des colis : composition chimique des déchets, présence de matières organiques, production de gaz, nature et dimensions du conteneur...

Liste des colis types du modèle d'inventaire

Colis types	Cat.	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 standard 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	
Déchets vitrifiés	C	C0	C0.1		Déchets vitrifiés PIVER	
			C0.2		Déchets vitrifiés UMo	
			C0.3		Déchets vitrifiés AVM	
		C1			Déchets vitrifiés UOX/URE "thermique actuelle"	
		C2			Déchets vitrifiés UOX/URE "thermique future"	
		C3			Déchets vitrifiés UOX/MOX	
C4			Déchets vitrifiés UOX + Pu			
Combustibles REP EDF	CU	CU1			Combustibles usés REP UOX et URE	
		CU2			Combustibles usés REP MOX	
Combustibles CEA		CU3	CU3.1			Combustibles usés UNGG et EL4
			CU3.2			Combustibles usés Célestin
			CU3.3			Combustibles usés de la propulsion nucléaire

2.2.2 Quelques caractéristiques d'ensemble des colis types

2.2.2.1 Les colis de déchets B

Les déchets B rassemblent plusieurs colis types :



Fût en inox de 245 litres (bitume)

- *les colis types B2, qui représentent à eux seuls près de la moitié du volume du modèle d'inventaire pour les colis B, contiennent des déchets enrobés dans des matrices en bitume. Ils ne dégagent pas de chaleur. La radiolyse des matières organiques constitutives du bitume entraîne une production d'hydrogène,*
- *les colis types B5 rassemblent des déchets de structure d'assemblages combustibles et sont conditionnés, après compactage, en Conteneurs Standard de Déchets Compactés (CSD-C). La plupart présentent un faible dégagement thermique (imputable surtout au cobalt 60) qui diminue rapidement (30 watts lors de la production du colis, 10 watts après 15 ans de refroidissement). Certains colis B5 contiennent des déchets technologiques et organiques et peuvent produire de l'hydrogène par radiolyse des matières organiques,*
- *les colis types B1 (déchets d'exploitation du parc de réacteurs à eau pressurisée³ d'EDF et déchets de déconstruction issus du réacteur à neutrons rapides⁴ Superphénix) présentent une faible puissance thermique (20 watts lors de la production du colis, 3 à 4 watts après 15 ans de refroidissement) et constituent les déchets B les plus irradiants (débit de dose à quelques centimètres du colis de l'ordre de 50 Sv/h, au moment de la production, 15 Sv/h après 10 ans de refroidissement),*
- *les autres colis types, B3 (déchets technologiques et divers cimentés), B4 (déchets coques et embouts cimentés), B6 (déchets technologiques variés) présentent, quant à eux, une grande diversité de déchets et de modes de conditionnement.*

Des dégagements de gaz

Certains colis primaires B, notamment ceux dont les déchets sont enrobés dans du bitume et ceux qui contiennent de la matière organique (cellulose, PVC...), produisent, par radiolyse de leurs matériaux constitutifs, des gaz comme l'hydrogène (de 1 à 10 litres/an par colis à pression atmosphérique) mais aussi du gaz carbonique et du méthane. Les installations industrielles, nucléaires ou non, recourent à des mesures de sécurité fondées sur l'évacuation de ces gaz par la ventilation. Les études de faisabilité ont vérifié la possibilité de reconduire, durant l'exploitation du stockage, des mesures éprouvées dans l'industrie. Après fermeture du stockage, lorsqu'elle serait décidée dans le cadre d'une gestion réversible, les gaz de radiolyse diffusent dans le milieu et les ouvrages sous forme gazeuse et dissoute dans l'eau ; il a été vérifié qu'ils ne créent pas, à terme, de surpression susceptible d'altérer irréversiblement le confinement des déchets.

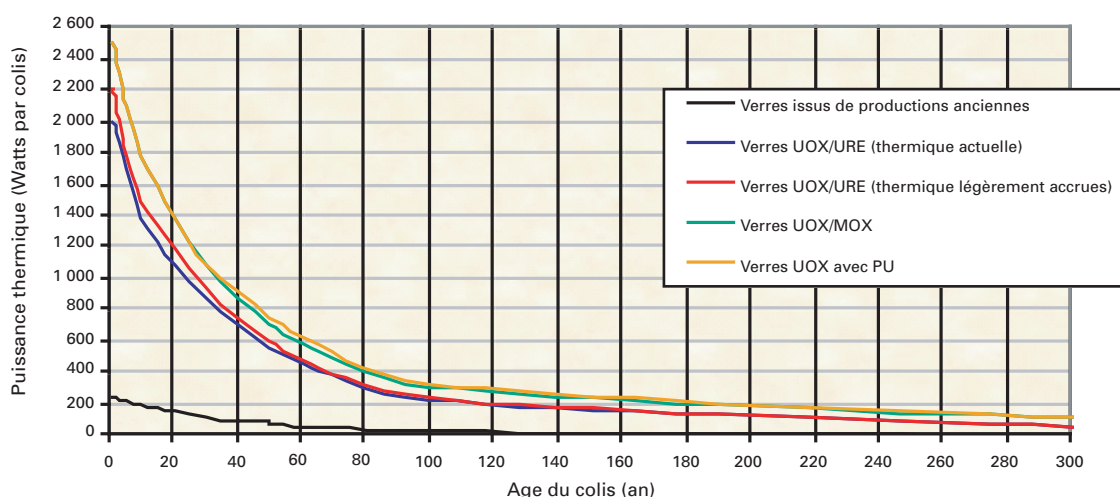
Certains colis peuvent aussi contenir des traces de radionucléides gazeux ; leurs relâchements sont très limités et ne peuvent induire qu'une très faible exposition radiologique. Néanmoins, pour en protéger les personnes et l'environnement, ces gaz sont autant que possible confinés dans les colis ; si une faible part était relâchée, elle serait captée par la ventilation.

³ appelé REP.
⁴ appelé RNR.

2.2.2.2 Les colis de déchets C

Cinq colis types C recouvrent les familles de colis de déchets vitrifiés existantes et prévisionnelles :

- le colis type C0 regroupe des déchets anciens, qui présentent un dégagement thermique moyen : colis anciens fabriqués dans l'installation expérimentale PIVER à Marcoule, déchets « UMo » issus du traitement de combustibles de l'ancienne filière de réacteurs Uranium Naturel Graphite Gaz (UNGG), actuellement entreposés à La Hague et prévus d'être vitrifiés, colis de déchets vitrifiés produits dans l'atelier de vitrification de Marcoule, principalement à partir de combustibles UNGG,
- les autres colis C sont *fortement exothermiques*. Les colis types C1 et C2 regroupent les déchets vitrifiés issus du traitement de combustibles UOX/URE produits actuellement (C1) ou dont le traitement est envisagé à court terme (C2). S'y ajoutent deux colis types (C3/C4) qui ne correspondent pas à la pratique actuelle du traitement mais visent à explorer des schémas alternatifs envisageables : ils prennent en compte davantage d'actinides (américium, curium, voire plutonium à titre exploratoire) et correspondent notamment au traitement de combustibles MOX, dont les déchets seraient mélangés à ceux du traitement de combustibles UOX (à raison de 15 % de MOX et de 85 % d'UOX). Le niveau d'irradiation varie suivant le type de colis et son âge. Il est de l'ordre de 250 Sv/h après 60 ans de refroidissement, pour les colis C les plus irradiants.



Colis primaires C

Les déchets vitrifiés sont conditionnés dans des conteneurs CSD-V (conteneur standard de déchets vitrifiés) en acier inoxydable, identiques (matériaux, géométrie) pour tous les colis C0.2, C1 à C4 (hauteur 1 340 mm, diamètre 430 mm).

Le conteneur utilisé à l'atelier de vitrification de Marcoule (AVM, colis type C0.3) diffère du CSD-V par son diamètre (500 mm) et sa hauteur (1 015 mm).

Les conteneurs en acier inoxydable de déchets vitrifiés PIVER (colis type C0.1) sont de même diamètre mais leur hauteur varie (575 à 875 mm). La masse de ces colis est inférieure à 130 kg. Celle des autres colis C est d'environ 500 kg.

2.2.2.3 Les combustibles usés

Les combustibles usés (CU) ne sont pas considérés comme des déchets ; ils ont néanmoins été examinés comme des objets d'étude :

- les combustibles issus du parc de réacteurs REP d'EDF sont regroupés en deux types : CU1 pour les combustibles UOX/URE et CU2 pour les combustibles MOX qui se distinguent par leur géométrie, en particulier leur longueur. Leur masse n'excède pas 800 kg. Comme les déchets C, ils se caractérisent par un *dégagement thermique important*. La contribution supérieure du plutonium et de l'américium à ce dégagement thermique se traduit par une *décroissance plus lente dans le temps*. Deux situations sont prises en compte pour le conditionnement : d'une part, les combustibles pourraient être livrés en l'état dans un atelier où ils seraient

directement conditionnés en conteneurs de stockage ; d'autre part, ils pourraient avoir été préalablement placés dans des *étuis*, tels que considérés par le CEA dans l'étude d'un entreposage de longue durée,

- les combustibles issus de la recherche et de la défense nationale sont regroupés dans le type CU3 : ils sont de petite dimension et leur puissance thermique est modérée ou faible (inférieure à 200 Watts).

2.2.3 Des inventaires quantitatifs selon les scénarios

Dans le cadre des scénarios présentés ci-dessus, la quantification du nombre de colis types s'appuie sur les inventaires et les prévisions de production de déchets établies par les producteurs. De manière générale, des estimations hautes, à caractère enveloppe, ont été retenues. Pour les déchets à produire, des marges de dimensionnement ont été ajoutées afin d'intégrer les incertitudes. De plus, par prudence, il n'a pas été tenu compte de possibilités éventuelles de gestion de certains colis de déchets existants ou à produire (une partie des déchets bitumés notamment) dans le cadre d'autres solutions de stockage.

Nombre et volume de colis primaires, pour les colis types de déchets B

Colis type	Scénario S1a		Scénario S1b		Scénario S1c		Scénario S2	
	Nombre	Volume (m ³)	Nombre	Volume (m ³)	Nombre	Volume (m ³)	Nombre	Volume (m ³)
B1	2 560	470	2 560	470	2 560	470	2 560	470
B2	104 990	36 060	104 990	36 060	104 990	36 060	104 990	36 060
B3	32 940	27 260	32 940	27 260	32 940	27 260	30 390	24 540
B4	1 520	2 730	1 520	2 730	1 520	2 730	1 520	2 730
B5	42 600	7 790	39 900	7 300	39 900	7 300	13 600	2 490
B6	10 810	4 580	10 810	4 580	10 810	4 580	10 810	4 580
B7	3 045	1 440	3 045	1 440	3 045	1 440	3 045	1 440
B8	1 350	775	1 350	775	1 350	775	1 350	775
Total	199 815	81 105	197 115	80 615	197 115	80 615	168 265	73 085

Nombre et volume de colis primaires, pour les colis types de déchets C

Colis type	Scénario S1a		Scénario S1b		Scénario S1c		Scénario S2	
	Nombre	Volume (m ³)	Nombre	Volume (m ³)	Nombre	Volume (m ³)	Nombre	Volume (m ³)
C0	4 120	700	4 120	700	4 120	700	4 120	700
C1	4 640	810	4 640	810	38 350	6 710	4 640	810
C2	990	170	27 460	4 810	0	0	5 920	1 040
C3	13 320	2 330	0	0	0	0	0	0
C4	13 250	2 320	0	0	0	0	0	0
Total	36 320	6 330	36 220	6 320	42 470	7 410	14 680	2 550

Nombre d'assemblages de combustibles usés, le cas échéant

	Scénario S1a	Scénario S1b	Scénario S1c	Scénario S2
Assemblages UOX de type CU1	0	0	0	54 000
Assemblages MOX de type CU2	0	5 400	5 400	4 000

2.2.4 L'inventaire radiologique

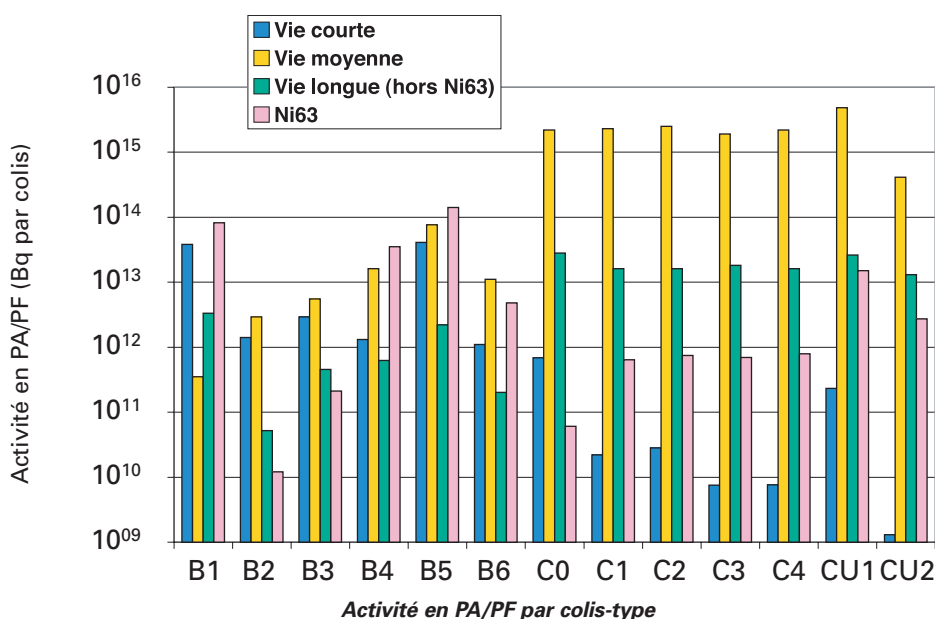
L'inventaire radiologique des colis résulte de la présence de produits de fission ou d'activation dans les déchets ainsi que d'actinides.

• Les produits de fission et d'activation (PF / PA)

Les radionucléides à vie courte (inférieure à 6 ans), cobalt 60 en particulier, et moyenne (entre 6 et 30 ans), césium 137 et strontium 90 notamment, représentent une part très importante de l'activité en produits de fission et d'activation. L'activité à vie moyenne se répartit essentiellement dans les déchets C ; dans

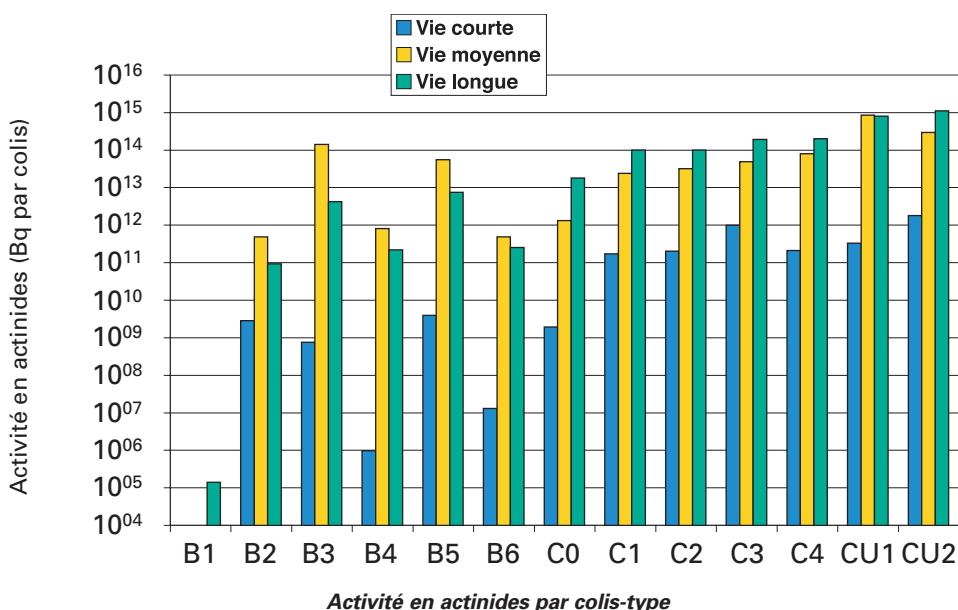
les déchets B, elle est très inférieure (d'au moins un facteur 100) et concerne les colis types regroupant des déchets de structure d'assemblages combustibles (B5.1/B5.2, B5.3, B4 et B6.3).

Les produits de fission et d'activation à vie longue (hors nickel 63) représentent, en comparaison, des activités plus faibles et sont surtout concentrés dans les colis C. Les colis de déchets B en contiennent aussi mais à des niveaux d'activité 100 à 1 000 fois inférieurs. Le nickel 63 constitue, quant à lui, un cas particulier avec une période radioactive intermédiaire (100 ans). Il est présent à un niveau d'activité relativement élevé dans un grand nombre de colis. Son activité est significative dans les colis B, en particulier les types B1, B4 et B5.



• Les actinides

Les colis types contiennent aussi des actinides, en quantités variables : les colis C concentrent l'essentiel de l'inventaire en actinides initialement contenus dans les combustibles (hors uranium et plutonium extraits lors du traitement et présents à l'état de traces). Le contenu en actinides des colis types de déchets B n'est toutefois pas négligeable : les colis types B3 et B5 présentent des activités en actinides à vie moyenne comparables à celles des colis types de déchets vitrifiés C1 à C4. La part d'activité en actinides à vie longue est aussi plus importante dans les colis B3 et B5 que dans les autres colis B et se situe à un niveau proche de l'activité en actinides à vie longue du colis type C0.



Pour les radionucléides à vie longue, l'activité totale de l'ensemble des déchets du modèle d'inventaire est de 6.10^{+17} becquerels pour les produits d'activation et de fission (hors nickel 63) et 6.10^{+18} becquerels pour les actinides (dans le cas du scénario S1a de traitement total des combustibles EDF⁵). L'activité à vie longue est très largement concentrée dans les déchets C : 91 % de l'activité en produits d'activation et de fission à vie longue y est localisée ainsi que 97 % de l'activité à vie longue en actinides. Au sein des déchets B, les colis types B5 représentent l'essentiel de l'inventaire en radionucléides à vie longue, avec 75 % environ des produits d'activation et de fission et 67 % des actinides.

L'inventaire chimique des colis primaires de déchets

Les colis primaires de déchets présentent une grande diversité de composition chimique. Ils peuvent renfermer des métaux (par exemple aciers inoxydables, alliages de zirconium), des matières organiques (principalement bitume des colis type B2) ou du verre (déchets C).

Les aciers inoxydables et certains alliages contiennent du nickel et du chrome. Les déchets B, et dans une moindre mesure les déchets C, peuvent également contenir de l'aluminium ou du magnésium.

Le verre des déchets C contient du bore, élément chimique toxique lorsqu'il n'est pas immobilisé, qui est un constituant de la matrice vitreuse.

Certains déchets B renferment par ailleurs des matériaux constitués d'éléments tels que le plomb et le cadmium qui présentent une toxicité chimique lorsqu'ils sont accessibles dans l'environnement.

3. Le comportement à long terme des colis

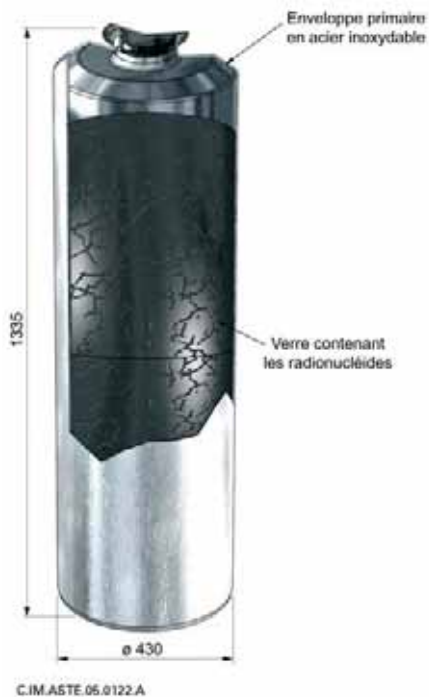
Pour déterminer les possibilités de relâchement de radionucléides par les colis en situation de stockage, l'Andra, les producteurs de déchets (EDF, COGEMA, CEA) et les laboratoires de recherche du CEA ont développé des études sur le comportement à long terme des colis. Les phénomènes susceptibles, en présence d'eau, de conduire à une altération des matrices et des déchets, puis à une mise en solution de radionucléides, ont été identifiés et les plus importants ont été modélisés pour procéder à leur évaluation quantitative. Les incertitudes et les limites de la modélisation vis-à-vis d'interactions complexes conduisent nécessairement à des simplifications : pour en tenir compte, les modèles retiennent en règle générale des hypothèses conservatives, allant dans le sens d'une surestimation du relâchement.

3.1 Les colis de déchets C

La problématique concerne le comportement de la matrice de verre lorsque de l'eau parvient à son contact, c'est-à-dire après la perte d'étanchéité du colis. Le phénomène est alors une lente dissolution des constituants du verre, principalement la silice. Cette dissolution dépend de plusieurs paramètres. Certains sont liés aux caractéristiques chimiques et physiques du verre, en particulier à son taux de fracturation qui détermine la surface réactive entre le verre et l'eau. D'autres paramètres concernent l'environnement du colis comme la température et le pH qui influent sur la solubilité de la silice. Les équilibres chimiques entre le verre, la silice en solution et les autres phases solides au voisinage interviennent par des processus de précipitation de la silice dissoute et de sorption de cette silice (notamment sur les produits de corrosion du conteneur métallique). L'étude de ces mécanismes a conduit à retenir deux modèles pour le comportement du verre :

- le modèle « $V_0 \rightarrow V_r$ » est applicable aux verres produits par l'usine COGEMA de La Hague (R7T7) depuis les années 1980, ou aux verres futurs qui seront produits selon des procédés similaires (colis types C1 à C4). Il rend compte des observations : d'abord une vitesse initiale (V_0) de dissolution, non contrôlée par la concentration de l'eau en silice (du fait des interactions avec les matériaux environnants), puis un ralentissement de cette vitesse vers une vitesse résiduelle (V_r) après saturation en silice des matériaux voisins. Ce modèle conduit à des durées de vie des matrices vitreuses de plusieurs centaines de milliers d'années au moins,

5 Le scénario S2 correspond à des ordres de grandeur similaires : 7.10^{+17} Bq pour les produits d'activation et de fission (hors ⁶³Ni) et $1,7.10^{19}$ Bq pour les actinides.



- le modèle « $V_0.S$ » concerne les colis types C0 contenant des déchets anciens surtout produits à Marcoule dans les années 1960-1970. Ce modèle pessimiste ne considère pas de ralentissement à terme de la vitesse initiale de dissolution et conduit à des durées de vie des matrices vitreuses allant de mille à quelques milliers d'années. Il a été retenu, faute de données suffisantes à ce stade.

Par prudence, les modèles considèrent que les radionucléides se trouvant dans la matrice de verre se dissolvent dans l'eau de manière congruente aux autres constituants du verre (c'est-à-dire à la même vitesse). Il n'est ainsi pas tenu compte de leur possible rétention dans la phase altérée du verre.



Les paramètres d'environnement qui influencent la dissolution du verre ont été mis en évidence et pris en compte dans les architectures de stockage pour favoriser la durabilité des verres (température, pH...)

Schéma d'un colis primaire de déchet C vitrifiés R7T7

3.2 Les colis de boues bitumées (colis types B2)

Dans ces colis, les radionucléides se présentent sous la forme de sels secs, enrobés de bitume. Lorsque de l'eau parvient au contact de l'enrobé, elle y diffuse lentement et atteint les sels (d'abord les plus proches de la paroi des colis) qui s'hydratent progressivement. Il en résulte, à terme, une dissolution des radionucléides contenus dans les sels ainsi qu'un gonflement de l'enrobé de bitume qui, par effet mécanique, voit sa perméabilité globalement augmenter. Les radionucléides relâchés peuvent alors migrer dans la zone de bitume plus perméable vers l'extérieur du colis.

Le modèle de relâchement proposé rend compte du lent transfert de l'eau dans l'enrobé et de la formation progressive d'une zone perméable ; il conduit à un relâchement progressif des radionucléides sur une durée comprise entre 10 000 ans et plusieurs dizaines de milliers d'années. *L'Andra a retenu 10 000 ans à titre conservatif.*

3.3 Les coques et embouts issus du retraitement des combustibles usés (colis types B4 et B5)

Ces déchets sont, pour l'essentiel, des déchets de structure des assemblages de combustibles : tronçons de gaines en alliage de zirconium ou de magnésium (coques), embouts en acier inoxydable, éléments divers (grilles, ressorts...) en acier inoxydable ou en alliage de nickel, auxquels s'ajoutent des déchets technologiques.

Les radionucléides contenus par ces déchets se trouvent :

- à la surface des déchets,
- à l'intérieur des matériaux métalliques (zircon, alliage de zirconium ou de magnésium, acier) ; cela concerne essentiellement des produits d'activation.

Le relâchement des radionucléides à l'arrivée d'eau au contact des déchets diffère selon ces deux catégories.

Immédiatement accessibles à l'eau, les radionucléides localisés en surface peuvent se dissoudre dès l'arrivée de celle-ci (ils sont dits labiles). Leur rétention repose principalement sur les propriétés de l'environnement apporté par le stockage : milieu réducteur limitant la solubilité de la plupart des radionucléides, rétention par les matériaux des ouvrages et dans la roche.

Les radionucléides localisés dans les matériaux métalliques, notamment les coques, sont quant à eux relâchés avec l'altération de ces matériaux par la corrosion. La vitesse de corrosion des matériaux contenant des produits d'activation (acier inoxydable, alliages de zirconium ou de nickel) conduit ainsi à :

- un relâchement progressif étalé sur *100 000 ans pour les produits d'activation contenus dans les alliages de zirconium,*
- un relâchement progressif sur des durées comprises entre *10 000 et 100 000 ans pour les produits d'activation contenus dans les aciers inoxydables et les alliages de nickel.*



***Ecorché (maquette) d'un colis CSD-C
montrant l'empilement de galette de déchets compactés***

3.4 Les autres colis B

Dans les autres colis de déchets B, les radionucléides sont généralement localisés à la surface des déchets. Aussi, on considère un mode de relâchement immédiat, similaire à celui décrit pour les radionucléides situés à la surface des déchets des colis types B4 ou B5.

3.5 Les combustibles usés

Les recherches ont porté sur le comportement des combustibles usés après la perte d'étanchéité du colisage. Les combustibles usés sont constitués de matériaux divers et leur état physico-chimique est hétérogène au sortir des réacteurs. La localisation des radionucléides diffère aussi. Schématiquement, ils se trouvent au sein et en surface des éléments de structure (gaines, embouts, grilles...), dans les pastilles d'oxyde d'uranium ou d'oxyde mixte uranium et plutonium (contenant la plus grande part de radionucléides) et dans les jeux entre pastilles à l'intérieur des gaines (dans ce cas, il s'agit de radionucléides gazeux ou volatils).

Pour les éléments de structure, le relâchement est commandé par la corrosion. Il convient toutefois de prendre en compte les conditions d'environnement spécifiques créées par la radiolyse de l'eau. L'analyse est ensuite similaire à celle développée pour les coques et les embouts, car la taille et la distribution des éléments de structure sont comparables.

Le relâchement des radionucléides localisés dans les pastilles s'effectue au fur et à mesure de la dissolution de la matrice d'oxyde d'uranium, qui dépend en particulier de la solubilité de l'uranium. Dans un environnement comme celui d'un stockage souterrain (milieu chimiquement réducteur), l'uranium est particulièrement peu soluble ; toutefois, la radiolyse de l'eau peut, dans un premier temps, induire très localement la présence d'eau oxydante ainsi qu'une solubilité accrue de l'uranium. Par prudence, un modèle de dissolution radiolytique des pastilles de combustible a donc été retenu à ce stade, bien qu'il soit jugé pessimiste au plan international.

En outre, les pastilles ne sont pas homogènes. Elles présentent des joints entre les grains ainsi qu'une zone altérée en surface (rim). Aussi, le contrôle du relâchement des radionucléides par l'altération de la matrice n'est retenu que pour la part de radionucléides localisés dans les pastilles et ne se situant ni dans les joints de grains, ni dans le rim. Ces derniers sont considérés labiles comme les radionucléides présents dans les jeux entre pastilles.

Ces différents éléments conduisent à retenir pour les combustibles :

- une fraction labile (c'est-à-dire relâchée dès l'arrivée d'eau) comprise entre 10 et 35 % de l'inventaire radioactif des combustibles, selon les types d'assemblages (UOX ou MOX),
- un taux de relâchement décroissant dans le temps pour les pastilles, conduisant à un relâchement étalé sur 50 000 à 100 000 ans selon le taux de combustion (valeur pessimiste a priori),
- un relâchement des produits d'activation localisés dans les éléments de structure sur environ 20 000 ans.



Assemblages de combustibles

Dossier 2005 Granite

2 L'étude de la conception d'un stockage en milieu granitique

2

p.30 > **1. La définition des fonctions de sûreté d'un stockage**

p.33 > **2. Le milieu granitique**

p.41 > **3. Les options générales pour la conception d'un stockage
en milieu granitique**

Le *concept de stockage en profondeur* repose sur l'idée qu'il existe des formations géologiques capables de confiner sur de très longues durées la radioactivité contenue dans les colis de déchets qui y seraient déposés. C'est le milieu géologique (argile, granite, sel...) qui doit assurer, à très long terme, le confinement des radioéléments à vie longue qui pourraient être relâchés par les colis de déchets. Il se place ainsi au cœur du système de stockage.

La conception d'un stockage en milieu granitique se fonde ainsi sur la capacité à *mobiliser, sur de longues durées, les propriétés favorables d'une formation géologique, le granite*. La première étape de l'étude de la conception d'un stockage consiste à *identifier les fonctions de sûreté imparties à un stockage* pour répondre aux objectifs généraux qui lui sont assignés : accueillir les colis de déchets dans le granite, isoler à long terme les déchets de l'homme et de l'environnement. Cette identification a été effectuée par une analyse fonctionnelle, dans le cadre de la *démarche de sûreté*.

Il faut ensuite identifier les *propriétés du milieu granitique* sur lesquelles peut se fonder la conception du stockage : caractéristiques générales et communes à l'ensemble des granites et variations possibles des propriétés entre les différents types de granites dans le contexte géologique français.

L'étude de la conception d'un stockage conduit alors à la *définition des dispositifs techniques* reposant sur les propriétés du milieu granitique et incluant des composants ouvragés pour assurer l'isolement des déchets sur de longues durées. Les options proposées sont adaptées à chaque catégorie de déchets (B, C). Des options pour le stockage de combustibles usés (CU) ont aussi été étudiées. Elles répondent à l'exigence de *réversibilité* du processus de stockage. Décrites au chapitre 4, elles constituent la base des analyses de sûreté (présentées au chapitre 5) qui dressent un bilan des performances et de la robustesse des concepts proposés.

1 La définition des fonctions de sûreté d'un stockage

1.1 L'analyse fonctionnelle : le pilotage de la conception par la sûreté

L'objectif fondamental de la gestion à long terme des déchets de haute activité et à vie longue (HAVL) est de protéger, sur une très grande durée, l'homme et l'environnement des risques associés à ces déchets. *La réponse apportée par un stockage consiste à confiner ces déchets dans une formation géologique profonde pour s'opposer à la dissémination des radioéléments qu'ils contiennent. Ce confinement s'effectue de manière passive sur de grandes échelles de temps (jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années), c'est-à-dire sans nécessiter à terme de maintenance ou de surveillance, comme le rappelle la Règle fondamentale de sûreté RFS III.2.f.*

L'architecture générale du stockage

De manière sommaire, un stockage consiste en un ensemble de cavités élémentaires (*les alvéoles*) creusées dans la roche située en profondeur (*formation hôte ou d'accueil*). Elles accueillent *les colis* de déchets et sont regroupées par grands ensembles (*modules*). Ces derniers sont reliés entre eux par des *galeries*, elles-mêmes desservies par un *réseau de voies d'accès* qui sont reliées à la surface par des *ouvrages d'accès* (*puits ou descenderies*). En surface existent des *installations* de support (accueil des colis primaires, conditionnement, etc.).

Le stockage dans ses différentes phases

- **Phase préparatoire à l'accueil des colis** : construction des installations de surface, des ouvrages de liaison entre la surface et les installations souterraines de stockage, des premiers modules de stockage.
- **Phase d'exploitation et d'observation** : la fonction principale du stockage est d'accueillir les colis dans la formation géologique. Dans la logique de réversibilité, l'exploitation procède par étapes, préservant à chaque étape la liberté de choix pour la gestion des déchets et des installations : réception et mise en stockage des colis, réalisation de nouveaux modules de stockage, observation et surveillance des installations et de leur évolution, fermeture progressive des ouvrages souterrains (par remblaiement et scellements), possibilité d'un retour en arrière. Aucune durée n'est fixée *a priori* pour la phase de réversibilité : l'échelle de temps est séculaire à pluriséculaire.
- **Phase postérieure à la fermeture** : la fonction principale du stockage est de protéger les personnes et la biosphère de la dissémination d'éléments radioactifs contenus dans les déchets. Cette phase consiste principalement à remblayer et à sceller les installations souterraines et correspond au plus faible niveau de réversibilité. D'une durée allant jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années, elle se caractérise par l'absence totale d'action humaine (de maintenance par exemple) dans les installations souterraines.

La RFS identifie des « *barrières* » de confinement : colis de déchets, barrières ouvragées (matériaux placés entre le colis et la roche), formation d'accueil du stockage, qui protègent les déchets en s'opposant aux circulations d'eau et aux actions humaines intrusives, et limitent et retardent le transfert des radionucléides dans le milieu géologique et la biosphère.

Dans une démarche itérative entre conception et sûreté, l'Andra a alloué *des fonctions de sûreté* à tous les composants du stockage ayant un rôle significatif (formation d'accueil du stockage, colis de déchets, barrières ouvragées). Les caractéristiques de ces composants (par exemple nature des matériaux et épaisseur des colis de stockage, dimensions des alvéoles...) ont été déterminées au regard de la sûreté en prenant en compte les possibles perturbations par l'environnement et les incertitudes.

La conception d'un système « multifonctions » complète ainsi la notion de système « multibarrières ». Certains composants contribuent à remplir une même fonction (complémentarité) ou à maintenir la fonction en cas de défaillance de l'un d'eux (redondance). Cette approche par fonctions de sûreté, associée à la vérification du niveau de performances de ces fonctions, est commune à la sûreté d'exploitation.

1.2 Fonctions de sûreté d'un stockage à long terme

Tout d'abord, le stockage en profondeur met les déchets à *l'abri des 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.

Dans ce contexte, *la maîtrise de la dispersion des radionucléides contenus dans les déchets repose sur trois fonctions majeures d'un stockage* :

- il s'oppose à la circulation d'eau,
- il limite le relâchement des éléments radioactifs et les immobilise dans le stockage,
- il retarde et atténue la migration des éléments radioactifs qui auraient été relâchés par les déchets.

A terme, ces trois fonctions doivent pouvoir être assurées de manière passive (sans intervention humaine). Certaines ne sont mobilisées que tardivement : par exemple, la capacité du stockage à limiter la migration de radionucléides ne devient opérante qu'après un début de relâchement de ces éléments par les colis. On parle alors de *fonctions latentes* dans la période où elles sont déjà disponibles mais non encore opérantes.

1.2.1 S'opposer à la circulation d'eau dans le stockage

Le confinement de la radioactivité contenue dans les colis consiste d'abord à l'y maintenir immobilisée. Le stockage doit donc :

- limiter le renouvellement d'eau autour des colis, car c'est le principal facteur susceptible d'altérer l'enveloppe des colis,
- s'opposer à un entraînement convectif des radionucléides pour, au contraire, restreindre leur possibilité de migration à la seule diffusion, phénomène très lent, en limitant à la fois le débit d'eau atteignant le stockage et la vitesse de circulation de l'eau entre les alvéoles et les failles conductrices d'eau du milieu granitique.

1.2.2 Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage

L'arrivée d'eau sur les colis de déchets, qui constituent une première barrière de confinement des radionucléides, ne peut pas être exclue à terme. Dans ces conditions, le stockage a pour fonction de limiter le relâchement des éléments radioactifs dans l'eau, de les « immobiliser » dans les déchets ou au plus près.

Les installations de stockage peuvent, en créant des conditions d'environnement physiques et chimiques favorables, limiter l'altération par l'eau des conteneurs de déchets et, à l'intérieur de ces conteneurs, celle des matrices (verre, bitume, ciment) où sont incorporés les radionucléides.

Quand l'altération par l'eau des colis de déchets a démarré, les conditions de stockage visent à limiter la mobilité des éléments radioactifs susceptibles de se dissoudre dans l'eau en créant des conditions géochimiques réductrices (complétées par le contrôle du pH) à même de maintenir ou de re-précipiter ces éléments radioactifs sous forme solide (seuls quelques radioéléments, tels l'iode 129 et le chlore 36, sont insensibles à ces conditions géochimiques favorables).

1.2.3 Retarder et atténuer la migration des radionucléides

L'une des fonctions du stockage est de retarder et de disperser, dans l'espace et dans le temps, afin de l'atténuer, la migration des éléments radioactifs relâchés par les déchets :

- la migration des éléments radioactifs dissous dans l'eau est contrôlée par la diffusion, la dispersion et la rétention dans le granite, formation d'accueil du stockage,
- la dissolution dans l'eau des radionucléides susceptibles d'être relâchés sous forme gazeuse permet de gérer de manière similaire ces éléments,
- en complément, la migration des éléments radioactifs peut être contenue à l'intérieur de certains composants du stockage (barrières ouvragées et corps de scellement en bentonite...), donc retardée.

1.3 Approche de la sûreté en phase de construction-exploitation-fermeture

La sécurité des travailleurs et la protection du public et de l'environnement pendant les phases d'exploitation du stockage sont des éléments essentiels dans la conception d'une installation. Elle passe par l'analyse des risques auxquels les travailleurs notamment peuvent être soumis, tant du fait des déchets radioactifs que des conditions de travail en souterrain.

S'il n'existe qu'un exemple de stockage de déchets radioactifs à vie longue en formation géologique en activité dans le monde (le stockage de déchets de moyenne activité et à vie longue du WIPP aux États-Unis), nombreux sont les retours d'expérience d'exploitation d'ouvrages souterrains et de manipulation de colis de déchets ou de combustibles usés de haute activité. Les risques sont ainsi bien identifiés et des dispositions pour les prévenir ou en réduire la gravité sont couramment mises en œuvre.

Au stade générique du Dossier 2005 Granite, les études de sûreté d'exploitation se sont inspirées, pour l'essentiel, de celles développées dans le cadre des études du stockage en milieu argileux. Elles ont porté sur

L'étude de la conception d'un stockage en milieu granitique

une première identification et hiérarchisation des risques et un premier aperçu des techniques de gestion associées. On s'est aussi assuré que les spécificités du contexte granitique (par exemple l'exposition plus probable au risque radon) ou les particularités des concepts proposés pour le granite par rapport à ceux définis pour l'argile n'induisent pas, en première approche, de difficulté spécifique.

2 Le milieu granitique

La conception d'un stockage vise en premier lieu à mobiliser les propriétés d'une formation géologique favorable à un stockage en profondeur afin qu'il assure les différentes *fonctions de sûreté* qui lui sont assignées.

En l'absence de site spécifique d'étude, l'étude de la conception du stockage ne peut s'appuyer sur la description d'un massif granitique particulier. Aussi, les principes de conception retenus par l'Andra se fondent en premier lieu sur les propriétés communes à l'ensemble des granites.

Les granites français présentent toutefois des caractéristiques particulières que les études de conception doivent intégrer afin de proposer des options pertinentes. L'Andra a donc établi un référentiel de connaissances sur les granites français qui a permis d'identifier les caractéristiques des granites pouvant influencer sur la conception d'un stockage.

2.1 Le granite, ses propriétés pour le stockage de déchets radioactifs

Pour l'étude d'un stockage, le mot *granite* désigne la fois une *roche* et une *formation géologique*. Le granite, formation géologique, s'organise généralement en massifs¹. Ainsi, la possibilité d'un stockage en milieu granitique dépend des propriétés de la roche ainsi que des caractéristiques et du contexte géologique du massif étudié.

2.1.1 La roche granitique : une roche dure et résistante

La perception commune du granite comme pierre depuis longtemps utilisée à des fins d'ornement pérenne, est celle d'une roche dure, très peu poreuse et très peu perméable.

La résistance mécanique de la roche est un élément naturellement intéressant pour la réalisation d'ouvrages en profondeur. Elle permet d'excaver la roche, sans exiger de soutènement important, sur des volumes compatibles avec les dimensions et la profondeur d'un stockage. Cette résistance mécanique s'explique par la texture de la roche constituée de quartz (silice cristallisée) et de feldspaths (silicates d'alumine).

Le quartz contribue aussi à la *conductivité thermique généralement élevée* de la roche, ce qui en fait une formation susceptible de dissiper aisément la chaleur émise par des déchets radioactifs.

La roche granitique contient peu d'eau : sa porosité à l'eau est généralement inférieure à 0,5 %. La perméabilité de la roche est très faible et peut être à la limite d'accessibilité aux mesures *in situ*.

Ces caractéristiques constituent des propriétés intéressantes *a priori* pour un stockage de déchets radioactifs.

¹ A la différence des formations géologiques sédimentaires qui sont généralement disposées en couches superposées (exemple : la formation argileuse du Callovo-Oxfordien du site de Meuse/Haute-Marne), les formations magmatiques comme les granites ont des géométries souvent plus volumiques (tri-dimensionnelles) que planaires. Pour les granites, le terme « massif » est générique et s'applique à la plupart des dispositions susceptibles d'être rencontrées.



Obélisque inachevée dans la carrière de granite d'Assouan



Carrière « Rock of Ages » (Vermont, USA)

2.1.2 Un massif granitique : une formation de vaste dimension et dont l'histoire géologique explique les propriétés

Un massif granitique susceptible d'accueillir un stockage est une formation géologique, généralement de vaste dimension, qui s'étend en profondeur, ce qui, compte tenu de la résistance de la roche, offre une grande flexibilité pour la conception architecturale d'un stockage.

Toutefois, à l'échelle d'un massif, le granite n'est pas une formation géologique monolithique et homogène. Il importe d'en comprendre et modéliser la structure avec suffisamment de détails pour étudier comment la conception d'un stockage pourrait y être adaptée.

Cette compréhension se fonde sur une caractérisation fine du massif étudié grâce à des méthodes mises en œuvre au cours des étapes successives de la reconnaissance d'un site. La complémentarité de ces méthodes permet de définir une démarche de reconnaissance progressive et adaptée au site étudié (voir chapitre 3).

L'interprétation des données recueillies s'appuie, en grande partie, sur la reconstitution de l'histoire géologique du massif granitique. Établir l'histoire géologique d'un massif granitique, c'est comprendre les phénomènes qui l'ont produit et structuré au cours des temps ; c'est aussi intégrer les différents composants d'un massif dans une logique historique cohérente et commune.

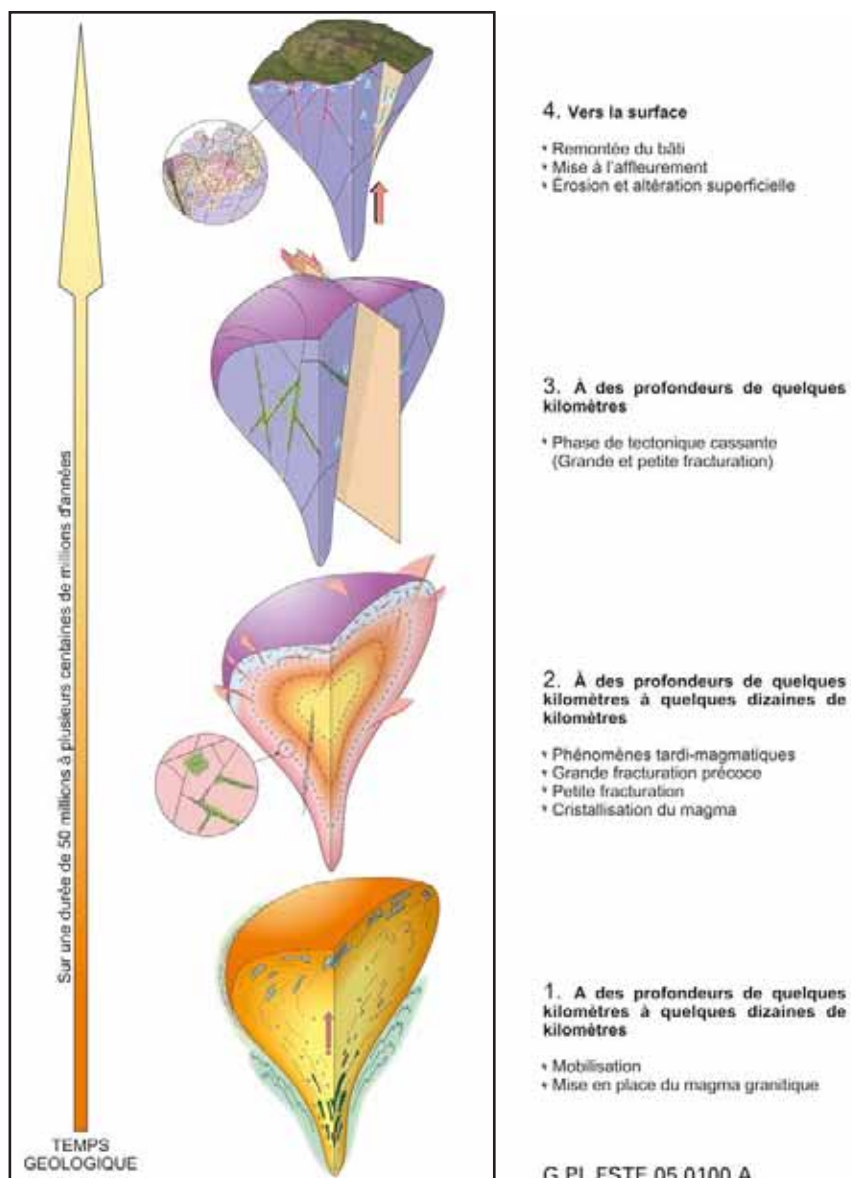
L'étude de la conception d'un stockage en milieu granitique

Un massif granitique : résultat d'une histoire géologique dont l'origine est profonde

Un massif granitique a pour origine un magma produit en profondeur en lien avec les mouvements et les collisions des « plaques » qui structurent la lithosphère du globe terrestre. Ce magma originel se met en place et se solidifie à plusieurs kilomètres de profondeur ou plus. Les conditions de cette mise en place déterminent la structure du granite et, pour partie, son mode de fracturation.

Le massif granitique devient alors un constituant de la croûte terrestre dont il suit l'évolution au cours des temps géologiques. Il peut ainsi être affecté par de nouvelles déformations et des fracturations. Il peut être « altéré » par la circulation de fluides hydrothermaux susceptibles de modifier la composition de la roche et de minéraliser les fractures. Enfin, la remontée de la croûte terrestre et les phénomènes d'érosion peuvent faire « affleurer » le massif granitique en surface.

Le massif garde les traces de ces différentes étapes de son histoire : enclaves des encaissants traversés par le magma, différenciations locales de roches de grain ou de minéralogie différents lors de la cristallisation, « altérations » de la minéralogie originelle, nature des minéraux remplissant les failles ou fissures créées lors de la fracturation de la roche, etc. Tous ces indices permettent de reconstituer l'histoire parfois complexe du massif granitique étudié. Cette histoire détermine ainsi les propriétés du massif granitique, mais aussi des éléments de son environnement.



Les étapes de l'histoire géologique d'un massif granitique

En profondeur, la roche est « saine » et les variations de composition sont le résultat de l'histoire géologique originelle du granite. Sur les affleurements de granite, entre la surface et une centaine de mètres, le dessin des fractures de la roche est souligné par les effets de l'altération, de la décompression, puis de l'érosion de la roche.

La nature lithologique et la composition minéralogique de la roche peuvent aussi évoluer d'un point à l'autre du massif, selon le mode de mise en place du granite. De façon générale, ces variations ne sont pas de nature à modifier significativement les propriétés mécaniques ou de perméabilité de la roche.

Plus importante est l'organisation de la fracturation du granite résultant de son histoire géologique. Ces fractures entraînent des discontinuités plus ou moins marquées dans les propriétés de la roche dont il faut tenir compte pour la conception d'un stockage.

Petite, moyenne et grande fracturations

Un massif granitique est parcouru par des fractures de tailles différentes. Leur nombre dépend de leur taille. Les petites fractures, de dimension métrique à décamétrique, sont beaucoup plus nombreuses que les grandes fractures, d'extension kilométrique à pluri-kilométrique. La moyenne fracturation, de dimension décamétrique à hectométrique, fait transition.

Les *petites fractures* peuvent affecter la perméabilité de la roche où seraient implantés les ouvrages de stockage. La perméabilité de la roche dépend des propriétés de chacune des petites fractures, de leur densité et de leur extension. Les petites fractures, qui peuvent être plus ou moins connectées, sont généralement très peu conductrices d'eau. Ainsi, la perméabilité du granite, à l'écart des grandes et moyennes fractures, est a priori faible ou très faible, et limite fortement les circulations d'eau.

Les *grandes fractures*, ou failles, sont les lieux privilégiés de circulation d'eau dans le granite, ce qui ne signifie toutefois pas qu'elles contiennent de grandes quantités d'eau. Ce sont les plus grandes failles, quand elles ne sont pas colmatées par des minéraux argileux, qui emmagasinent l'essentiel des eaux du granite.

2.1.3 Des écoulements hydrogéologiques lents en profondeur

L'eau présente dans les failles du granite se déplace très lentement en profondeur. Le moteur des déplacements est un *gradient hydraulique*, lié à la topographie. Schématiquement, plus la topographie est contrastée, plus les gradients tendent à être forts. Cependant, à cette force motrice qui tend à mettre l'eau du massif en mouvement, s'opposent de fortes pertes de charge dans les fractures du granite. En effet, les irrégularités de la géométrie intime d'un réseau de fractures constituent un obstacle au mouvement de l'eau.

2.1.4 Un environnement chimique en profondeur favorable pour un stockage

Dans un granite en profondeur, l'eau a une composition chimique généralement en équilibre avec la roche ou les minéraux des fractures qui la contiennent. L'environnement chimique est ainsi généralement réducteur. Le pH d'une eau en équilibre avec une roche granitique est généralement voisin de la neutralité ou légèrement basique². Ces conditions sont favorables d'une part à la durabilité des matériaux qui pourraient être utilisés dans un stockage, d'autre part à l'immobilisation de la plus grande partie des radionucléides.

2.1.5 Failles et fractures d'un granite : une capacité à retarder la migration de radionucléides

Si les fractures d'un granite sont potentiellement le lieu de circulation de l'eau, vecteur possible du transfert de radionucléides qui auraient été relâchés par un stockage, elles sont également le siège de phénomènes susceptibles d'immobiliser ou de retarder cette migration. Cet aspect majeur a fait l'objet d'importants travaux au niveau international.

En particulier, des expérimentations réalisées *in situ*, notamment dans le laboratoire souterrain d'Äspö (Suède), ont identifié les différents phénomènes de retard à la migration de radionucléides dans les fractures et permis de bien en comprendre la nature.

² Dans certains contextes particuliers, le pH peut au contraire être légèrement acide.

En particulier, la détermination des relations entre ces phénomènes et les caractéristiques géologiques et minéralogiques des fractures permettent d'extrapoler les résultats expérimentaux à différents types de granites en fonction de leurs caractéristiques propres.

2.2 La variabilité des granites dans le contexte géologique français

Si la conception d'un stockage dans un granite s'appuie sur les propriétés génériques du milieu granitique, elle intègre aussi les spécificités d'un massif particulier. *En l'absence de site d'étude particulier, l'Andra a réalisé une analyse typologique* afin de recueillir des données sur la variabilité des granites français. Appréhender les différences entre granites permet de les prendre en compte dans la conception et les analyses de sûreté afin d'assurer que les options de conception proposées remplissent les différentes fonctions de sûreté.

2.2.1 Une méthode d'analyse adaptée à un contexte d'études « sans site »

La variabilité des propriétés des granites français a ainsi été appréhendée par *une analyse typologique*, fondée sur un large inventaire. L'analyse s'est focalisée sur le Massif Central et le Massif Armoricaïn, les deux plus vastes zones du socle cristallin à l'affleurement sur le territoire français.



Les granites en France

On a exclu de l'inventaire des zones granitiques celles, qui, à l'évidence, ne satisferaient pas aux principaux critères de la RFS III.2.f. Notamment les zones considérées ont une surface supérieure à 20 km² et se situent à l'écart des grandes failles³. 78 zones granitiques ont ainsi été prises en compte.

Dans un premier temps, l'analyse a consisté à décrire les caractéristiques des granites en évaluant leurs variations, avérées ou potentielles, et la manière dont elles peuvent influencer les choix de conception du stockage. Les granites ayant rarement été reconnus directement en profondeur, en-dehors de quelques zones minières spécifiques, ceux-ci ont été décrits à partir de la cartographie de leurs surfaces affleurantes. L'extrapolation des caractéristiques géométriques ou de fracturation à la profondeur a été réalisée à partir d'arguments géologiques.

Les caractéristiques thermiques et hydrogéologiques ont été définies à partir de modélisations et d'extrapolations. Celles-ci se sont appuyées, pour la caractérisation des « altérations » hydrothermales, la détermination des flux thermiques ou les mesures de transmissivité hydraulique, sur les données de forages disponibles. Des analyses de sensibilité correspondant au niveau d'incertitude constaté ont également été réalisées par modélisation.

Dans un second temps, lorsque les principales caractéristiques ont pu être suffisamment renseignées dans l'inventaire, l'analyse statistique de leur variabilité dans le contexte géologique français a été conduite. Elle a permis, pour chaque propriété étudiée, de classer les granites en différents « types » et d'apprécier ainsi la répartition des variations des propriétés des granites français.

En outre, une comparaison des propriétés des massifs étudiés et de celles des granites étrangers a permis de valider l'utilisation des données recueillies en laboratoires souterrains étrangers.

2.2.2 Principaux enseignements de l'analyse : variabilité des propriétés des granites français pour la conception d'un stockage et les analyses de sûreté

- **La résistance mécanique** de la roche granitique diffère selon les types de granite, en fonction notamment de leur altération hydrothermale. Cependant, ces variations ne sont généralement pas susceptibles d'entraîner des différences significatives dans la réponse d'un granite à l'excavation d'ouvrages. Aussi, les différences pour la conception architecturale d'un stockage sont mineures et n'ont d'incidence que pour le dimensionnement détaillé des ouvrages en souterrain.

- **La variabilité des propriétés thermiques** des granites français est suffisamment importante pour intervenir dans l'étude du stockage des combustibles usés. Sur ce point, la différence est sensible avec les granites fénno-scandinaves où la température dans le sous-sol est inférieure d'environ 10°C. Pour les déchets C, et *a fortiori* les déchets B5 et B1, faiblement exothermiques, les différences entre granites ne sont pas en mesure de modifier significativement le dimensionnement d'un stockage.

Propriétés thermiques et dimensionnement d'un stockage

La température d'un granite en profondeur et la conductivité de la roche constituent des paramètres importants de dimensionnement des architectures d'un stockage. En effet, la conception d'un stockage doit gérer l'évacuation de la chaleur dégagée par les déchets C et, le cas échéant, par les combustibles usés. Pour mieux répartir les sources de chaleur et maîtriser l'évolution de la température dans le stockage, on peut jouer sur l'espacement des colis dans la roche.

La température initiale du granite en profondeur n'est pas directement accessible sans forage. Aussi, des modélisations ont été fondées sur les cartes de flux thermique de la France et la conductivité thermique des roches en fonction de leur richesse en quartz. Les estimations faites pour une profondeur de 500 mètres conduisent à des incertitudes sur les températures initiales de plus ou moins 3°C/3,5°C selon les massifs. ...

³ Une « garde » de 1,5 ou 3 km a été retenue en fonction de l'importance de la faille.

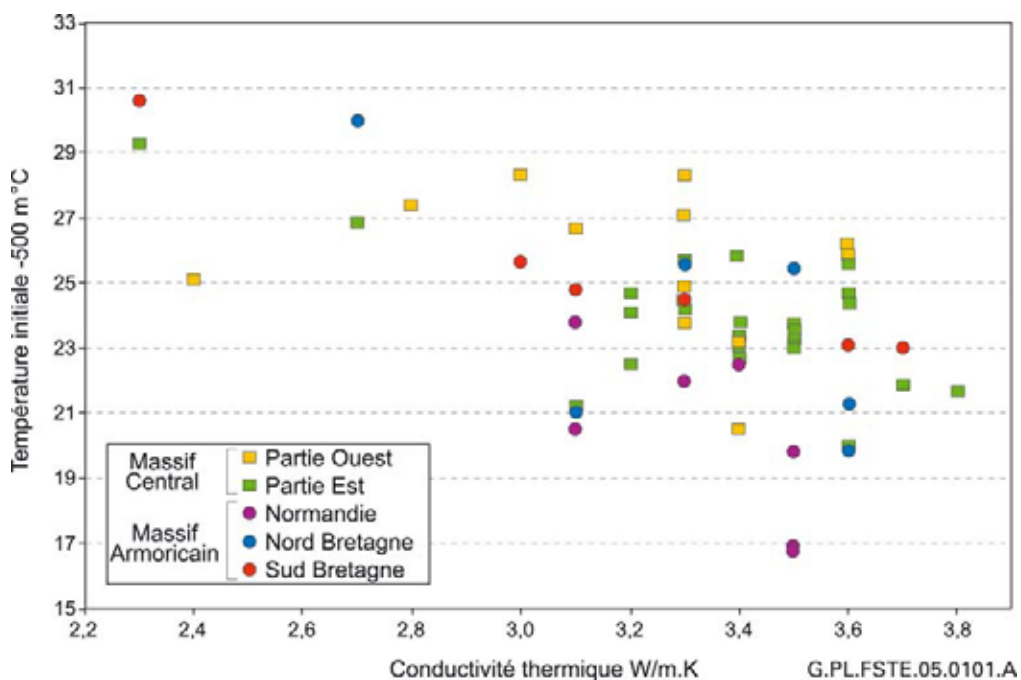
L'étude de la conception d'un stockage en milieu granitique

...

Le graphe ci-dessous illustre les situations relativement contrastées des différents granites français. Les températures initiales à 500 mètres de profondeur varient entre 17 et 30 °C. La conductivité de la roche a des valeurs allant de 2,4 à 3,8 W/m.K.

Le dimensionnement d'un stockage de combustibles usés est sensible à de telles différences : l'emprise du stockage de combustibles usés du type MOX peut ainsi être augmentée ou diminuée de 30 %.

Pour les déchets C, les différences interviennent de façon moins sensible sur le dimensionnement d'un stockage pour les options de conception proposées. En effet, les considérations de dimensionnement mécaniques limitent les « gains » possibles pour les granites les plus favorables du point de vue thermique ; de plus, la mise en place d'une barrière ouvragée argileuse de plus forte épaisseur entre les colis et la roche dans les concepts étudiés tamponne les effets des différences de conductivité thermique entre granites.

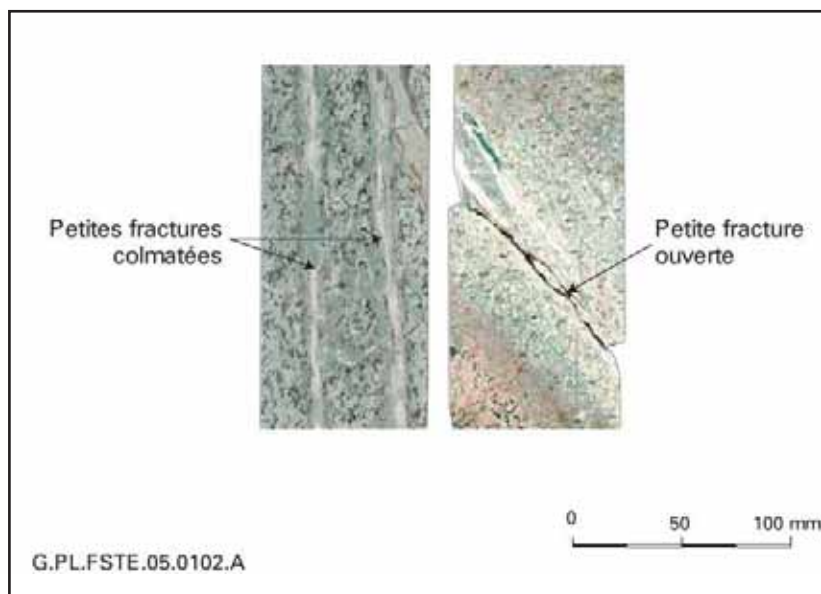


Estimation de la température à 500 m de profondeur de massifs granitiques français dans différentes régions

La géométrie de la grande fracturation des granites est un élément important pour la conception architecturale d'un stockage sur un site particulier. En fonction de l'histoire tectonique du massif, elle est plus ou moins régulièrement agencée et le fractionnement du massif plus ou moins prononcé. L'analyse d'un grand nombre de granites français montre cependant que si les dispositions de la grande fracturation varient entre massifs, la distribution des « blocs » de granite où pourrait être implanté un stockage répond à des règles relativement communes aux massifs français étudiés.

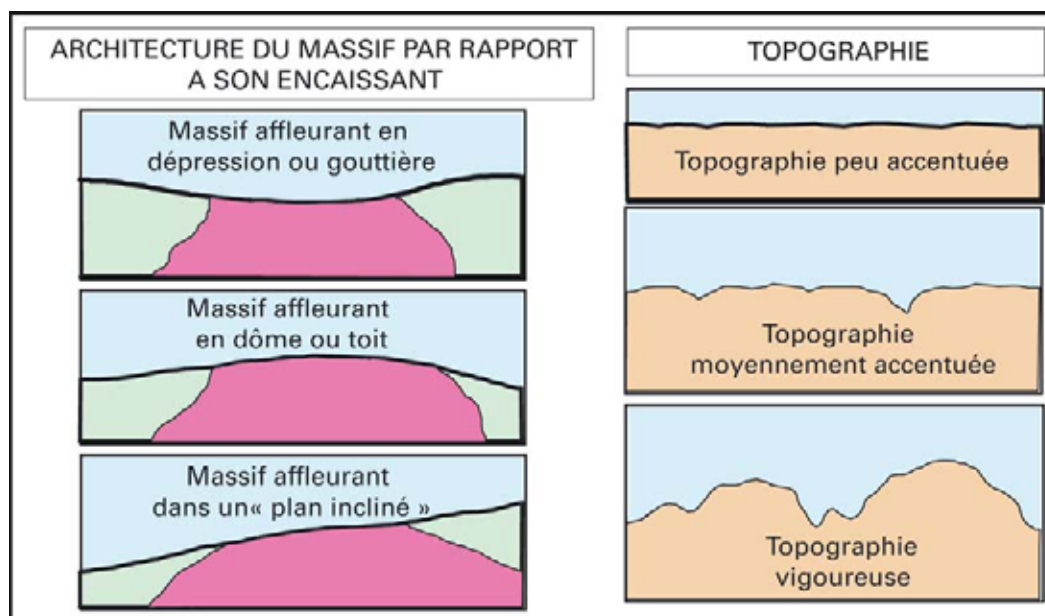
La petite fracturation d'un granite intervient, elle aussi, de façon importante pour la conception d'un stockage. En effet, la capacité à retarder et atténuer la migration des radionucléides par la roche va dépendre en grande partie des caractéristiques des petites fractures.

La conductivité hydraulique des petites fractures est généralement faible ou très faible (inférieure à 10^{-9} m/s). Dans ce domaine de faibles perméabilités, les valeurs peuvent toutefois varier notablement selon les granites et les types de fracture. Elles dépendent de leur géométrie, de leur orientation et de leur possible colmatage naturel par des minéraux. Il en est de même des propriétés de rétention des radionucléides par les fractures.



Fractures colmatées et fracture ouverte vues sur carottes de sondages dans un granite

Le contexte morpho-structural d'un granite a aussi été analysé. La topographie et la morphologie d'un site déterminent les gradients hydrauliques, moteurs des écoulements d'eau en profondeur. Les différences entre massifs français sont sensibles. L'analyse typologique a identifié trois grandes dispositions morpho-structurales de granite, prises en compte dans les analyses de sûreté : des massifs granitiques en dépression topographique par rapport aux formations géologiques encaissantes, des massifs en dôme, des massifs en « plan incliné ». Chacune peut correspondre à des topographies plus ou moins accentuées.



Morphologies de massifs granitiques et topographie

L'étude de la conception d'un stockage en milieu granitique

Du point de vue hydrogéochimique, l'inventaire et l'analyse des compositions chimiques des eaux des granites français montrent qu'on y rencontre des eaux dites alcalines et des eaux carbo-gazeuses. Les eaux carbo-gazeuses sont présentes dans le Massif Central et peuvent être reliées au contexte géodynamique et à l'activité volcanique plus ou moins ancienne. Les eaux alcalines correspondent à des compositions proches de l'équilibre avec le milieu granitique.

Ces différences de compositions ne sont pas de nature à modifier, dans leurs principes, les options de conception proposées. Elles pourraient conduire, pour certains massifs granitiques, à ajuster les formulations des barrières ouvragées à la composition chimique de l'eau.

Type d'eaux		pH	Na	K	Ca	Mg	Li	SiO ₂	Cl	SO ₄	HCO ₃
Alcalines	Site 1	8,80	4 400	142	128	1	78	1 790	227	1 010	1 800
	Site 2	8,86	5 430	116	850	3,3	55	850	4 200	1 350	2 750
Carbo-gazeuses	Site 3	6,64	95 500	4 360	1 570	1 940	1 420	1 700	105 100	6 500	29 500
	Site 4	6,80	41 700	635	3 550	3 500	590	770	1 200	220	57 100
	Site 5	6,67	39 100	2 420	15 100	16 100	770	2 100	56 600	2 600	40 200

Exemples de compositions chimiques d'eaux en divers contextes français (teneurs en mg/l)

Du point de vue de l'évolution géologique d'un site à long terme, l'analyse typologique des massifs granitiques étudiés confirme qu'une grande partie d'entre eux se situe à l'écart de zones géodynamiques actives, c'est-à-dire à l'abri de modifications sensibles, sur le long terme, de leur disposition géologique, notamment de leur fracturation en profondeur. Les changements climatiques et l'érosion peuvent aussi modifier le contexte hydrogéologique et topographique d'un site sur le long terme. Des variations existent entre massifs du fait, notamment, des différences de contexte morfo-structural. L'analyse a ainsi identifié les principales dispositions rencontrées dans le contexte français et les phénomènes pouvant intervenir à l'échelle de 10 000, 100 000 et 1 000 000 d'années. On constate qu'à l'échelle de 100 000 ans, les modèles n'identifient pas de différences significatives d'évolution entre massifs. Au-delà de 100 000 ans, la situation de chaque massif serait à prendre en compte de façon spécifique dans le cadre d'une étude de site particulière.

3 Les options générales pour la conception d'un stockage en milieu granitique

Pour assurer les fonctions de sûreté à long terme, la conception proposée pour un stockage en milieu granitique consiste à :

- mobiliser, grâce à différentes dispositions techniques, les propriétés favorables du milieu granitique, notamment la très faible perméabilité de la roche et sa résistance mécanique,
- concevoir des composants ouvragés du stockage (colis de stockage, barrières ouvragées, remblais, scelllements) afin qu'ils contribuent de façon complémentaire ou redondante avec le milieu granitique aux fonctions de sûreté,
- retenir des options de conception tendant à limiter les perturbations du milieu granitique par le stockage.

Outre la sûreté à long terme et en exploitation, la conception doit répondre à l'exigence de réversibilité, étroitement liée à l'application du principe de précaution, prévue par la loi du 30 décembre 1991. Au-delà de la capacité à retirer des colis stockés (la récupérabilité), la réversibilité renvoie à une gestion prudente, par étapes successives, d'un éventuel stockage qui, compte tenu des échelles de temps considérées, laisse les choix ouverts aux générations suivantes.

Ces principes conduisent à retenir différentes dispositions techniques pour l'architecture du stockage, son dimensionnement, le choix des matériaux des composants ouvragés ou le processus de stockage. Certaines dispositions, notamment architecturales, sont communes aux différentes catégories de déchets (B, C) et aux combustibles usés ; d'autres, par exemple la conception des composants ouvragés, sont plus spécifiques à chacune des catégories.

3.1 Mobiliser les propriétés favorables du granite

Le milieu granitique se caractérise par une roche très peu perméable, dotée de capacité de rétention des radionucléides et mécaniquement résistante. Le granite étant recoupé par des fractures susceptibles d'être conductrices d'eau, la mobilisation de ses propriétés favorables implique d'adapter l'architecture du stockage à cette fracturation.

3.1.1 Une architecture fractionnée et adaptée à la fracturation du granite

L'architecture d'un stockage est organisée en différentes zones par grandes catégories de colis : déchets B, déchets C, combustibles usés. Ces zones sont suffisamment distantes pour éviter des interactions entre déchets de types différents, notamment de nature thermique ou chimique. Le fractionnement de chaque zone de stockage réduit également la quantité de déchets et d'éléments radioactifs qui seraient affectés dans une situation de défaillance ou d'intrusion.

En plus de l'application de ces principes de conception, l'architecture du stockage et son fractionnement résultent de la fracturation du granite.

• Une implantation à l'écart des failles

À l'échelle du stockage, les zones de stockage correspondant aux différentes catégories de déchets sont implantées à l'écart des grandes failles d'un massif granitique.

Chaque zone du stockage est divisée en *modules* regroupant un ensemble de cavités de stockage, les alvéoles, d'un même type de déchets. Les modules sont implantés dans des « blocs » de granite non recoupés par des failles, grandes ou moyennes, significativement conductrices d'eau. Un des principes fondamentaux d'un stockage en milieu granitique est en effet *d'implanter les alvéoles de stockage dans la roche très peu perméable*. Ceci ne signifie pas que la roche y est dépourvue de toute fracturation, mais que les petites fractures susceptibles d'exister aux parois des alvéoles sont très peu ou pas conductrices d'eau. Les flux d'eau pouvant parvenir au contact des colis sont ainsi très faibles.

Les alvéoles sont « borgnes » (une de leurs extrémités est limitée par la roche granitique), donc sans accès vers les galeries du stockage, ce qui limite les possibilités de circulation d'eau provenant des galeries.

Ces principes, relatifs à l'implantation du stockage et à son architecture, répondent aux exigences exprimées dans la Règle fondamentale de sûreté III.2.f qui précise :

« L'implantation du stockage dans la formation géologique devra se situer dans les milieux cristallins, au sein d'un bloc-hôte exempt de grandes failles, celles-ci étant susceptibles de constituer des secteurs de circulation hydraulique privilégiée. Les modules de stockage devront être réalisés à l'abri de la fracturation moyenne, celle-ci pouvant toutefois être traversée par les ouvrages d'accès ».

• Une implantation des modules en fonction de la thermicité des déchets

À l'échelle des modules, ce principe d'adaptation de l'architecture à la fracturation se décline de façon différenciée selon le type de déchets. En effet, l'emprise requise pour le stockage des différents colis peut conduire à des options différentes.

La non (ou faible) thermicité des déchets B rend possible la réalisation d'alvéoles de stockage compactes, nécessitant un faible volume de granite. Le stockage des déchets B nécessite ainsi une faible emprise et l'ajustement architectural à la fracturation du granite s'en trouve facilité. Les modules de stockage sont implantés de façon à éviter les fractures susceptibles d'entraîner une circulation convective d'eau.

L'étude de la conception d'un stockage en milieu granitique

Les caractéristiques thermiques de déchets C et des combustibles usés déterminent le dimensionnement des modules de stockage et conduisent à des emprises telles qu'il n'est pas possible d'exclure qu'un module de stockage recoupe une fracture éventuellement conductrice⁴. Aussi, l'architecture du stockage doit s'adapter à deux niveaux de fracturation. La dimension des alvéoles permet de les implanter dans une roche granitique très peu fracturée et très peu perméable. Les modules sont implantés dans des « blocs » de granite évitant les fractures qui seraient trop conductrices d'eau, la « fracturation moyenne » mentionnée par la RFS III.2.f.

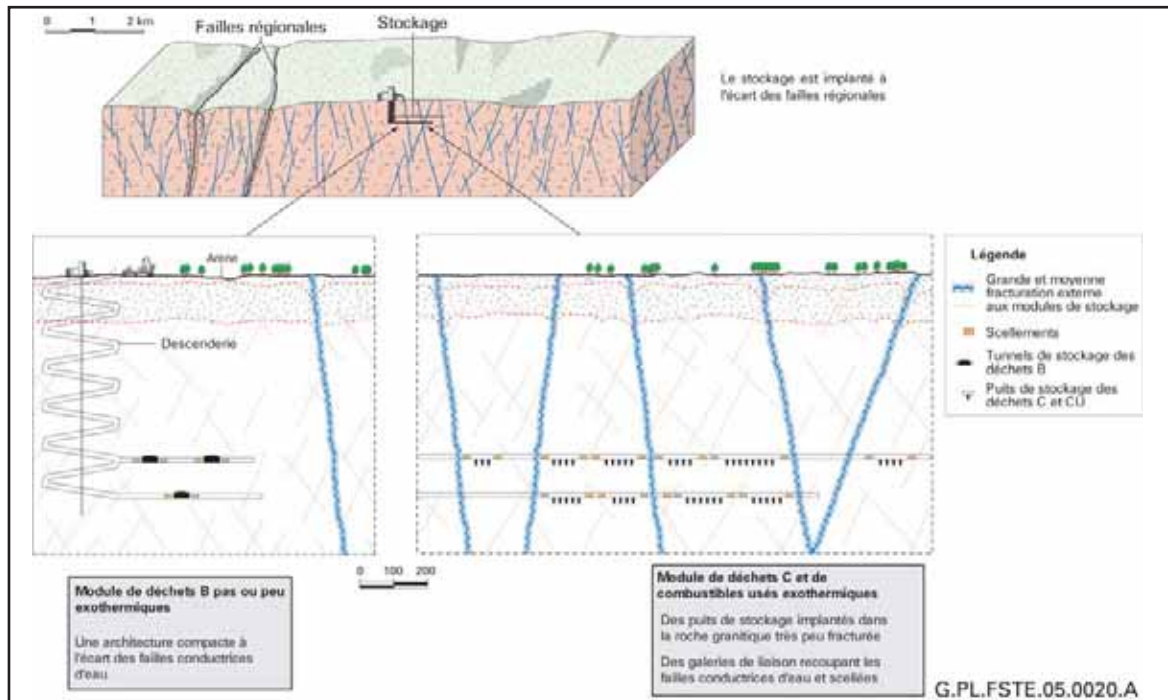


Schéma conceptuel de l'implantation des ouvrages de stockage en relation avec la fracturation

Le large volume de roche granitique disponible en profondeur entre 300 et 1 000 mètres pour un stockage offre de la flexibilité pour adapter l'architecture à la fracturation du granite. L'architecture générale du stockage peut ainsi être conçue sur un ou plusieurs niveaux.

D'un point de vue fonctionnel, ces dispositions architecturales permettent au stockage de remplir une première fonction en s'opposant au mouvement convectif d'eau dans les installations souterraines. Au niveau des alvéoles de stockage, ceci contribue à favoriser un régime de transfert diffusif. Dans les galeries des modules, le débit d'eau est limité. En outre, le stockage est situé à l'écart des failles régionales, à l'abri de circulations d'eau majeures.

Ces dispositions architecturales contribuent aussi aux autres fonctions du stockage en limitant le relâchement des radionucléides par les alvéoles de stockage et leur migration vers l'environnement.

3.1.2 Un processus de stockage permettant une reconnaissance et une caractérisation « à l'avancement » des blocs de granite où sont implantés les modules

Adapter l'architecture du stockage à la fracturation implique de connaître avec suffisamment de précision et d'assurance les caractéristiques du granite-hôte. La stratégie de reconnaissance peut comporter plusieurs étapes :

- des travaux de reconnaissance et de caractérisation d'un granite à partir de la surface ou d'ouvrages souterrains de qualification du milieu afin de définir la structure du granite où serait implanté le stockage. Une démarche itérative entre les analyses de sûreté et les différentes phases de reconnaissance d'un site granitique, en surface puis en souterrain, permet de définir les critères d'exclusion des failles (ou fractures) pouvant être recoupées ou non par les galeries de liaison dans le stockage, les galeries d'accès aux modules et aux alvéoles,

⁴ Compte tenu des volumes et de leur thermicité, le stockage de combustibles usés est plus exigeant en termes d'emprise que celui des déchets C.

- sur cette base, le processus inclut une caractérisation *in situ* des blocs de granite hôtes des modules de stockage avant stockage des colis. Cette étape de caractérisation « à l'avancement » lors de la construction progressive du stockage permet de préciser l'architecture des modules et la distribution des alvéoles de stockage dans le granite en fonction de sa fracturation.

Une telle stratégie vise à adapter au mieux l'architecture du stockage à la fracturation du granite et à s'assurer que les dispositions conceptuelles proposées remplissent efficacement leurs fonctions vis-à-vis de la maîtrise de la circulation d'eau dans le stockage.

3.2 Concevoir des composants ouvragés complémentaires et redondants avec le milieu granitique pour la sûreté à long terme

À l'échelle du stockage dans son ensemble comme au niveau des alvéoles, plusieurs dispositions sont possibles pour assurer une complémentarité et une redondance entre le milieu granitique et les composants ouvragés d'un stockage vis-à-vis de la sûreté à long terme. Elles touchent plus particulièrement à l'architecture du stockage et au choix des matériaux des composants ouvragés (colis de stockage, barrières ouvragées, remblais et scellements).

3.2.1 Un scellement multiple des installations souterraines

Les galeries de liaison ou d'accès aux modules et aux alvéoles de stockage sont susceptibles de recouper des fractures conductrices d'eau. *Pour limiter les circulations d'eau dans le stockage, des scellements sont mis en place à différents niveaux des installations souterraines.*

À l'échelle des alvéoles de stockage, l'eau peut provenir des galeries desservant les alvéoles. En effet, les galeries sont susceptibles d'être traversées par une fracturation plus conductrice d'eau que la fracturation de la roche en paroi d'alvéole. L'architecture « borgne » des alvéoles, leur implantation dans une roche granitique très peu perméable et la mise en place de « bouchons » de très faible perméabilité à l'entrée des alvéoles limitent les circulations d'eau et visent à instaurer, dans les alvéoles, un régime de transfert dominé par les phénomènes de diffusion.

À l'échelle du module de stockage, les circulations d'eau sont limitées par :

- des scellements de très faible perméabilité implantés dans les galeries pour isoler les modules de l'eau qui proviendrait de failles conductrices, éventuellement recoupées par les galeries,
- des remblais de perméabilité suffisamment faible disposés dans les galeries des modules.

Les scellements et les bouchons d'alvéoles sont composés d'argile gonflante (bentonite) très faiblement perméable sur de très longues durées. Le remblai peut aussi incorporer des matériaux argileux lui assurant une perméabilité suffisamment faible.

À l'échelle du stockage, les galeries de liaison entre modules ainsi que les ouvrages entre la surface et le fond sont remblayés. Des scellements sont implantés dans les ouvrages d'accès là où ils recoupent des failles conductrices d'eau.

3.2.2 Un environnement physico-chimique favorable pour les colis de déchets

La conception des alvéoles de stockage vise à offrir un environnement physico-chimique favorable aux déchets et aux colis pour maîtriser leur altération dans le temps et contribuer à limiter le relâchement d'éléments radioactifs.

Cet environnement est assuré par les matériaux des colisages de déchets, dont le choix dépend du type, du volume, de l'inventaire radiologique et de la nature chimique de déchets, ainsi que par les barrières ouvragées.

Pour les déchets B contenant des éléments métalliques (colis types B1, B3, B4 et B5), l'objectif est de limiter la corrosion en créant un environnement chimique favorable (potentiel réducteur, pH 10 à 12,5) notamment en utilisant le béton pour le colissage des déchets. Pour les déchets B bitumés, il est de mobiliser durablement les propriétés de confinement du bitume (colis type B2) en contrôlant les conditions chimiques et de température (entre 20 et 30 °C).

Pour les déchets C et les combustibles usés, des barrières ouvragées argileuses placées entre les colis et la roche granitique tamponnent les interactions chimiques entre les colis et l'eau provenant du granite.

3.2.3 Des colis de stockage étanches ou très peu perméables pendant une durée suffisamment longue

Pour assurer la complémentarité avec la barrière géologique, les colis primaires sont placés dans des conteneurs additionnels, l'ensemble constituant les colis de stockage. Ceux-ci ont été étudiés en recherchant une étanchéité ou une très faible perméabilité pendant une durée suffisamment longue. Cette durée dépend du type de déchets et de leur inventaire radiologique.

Pour les déchets B, la conception retient un colis de stockage en béton. Pour certains déchets (colis B1 et B5 dont le contenu radioactif est important et qui ne dégagent pas de gaz), le colis de stockage est doté d'une propriété de confinement durable (pendant une dizaine de milliers d'années). Cette performance peut être obtenue par une formulation du béton adaptée (très faible perméabilité et très faible porosité) et une conception spécifique (mode de fermeture). Ce conteneur permet de limiter l'arrivée d'eau au niveau des colis primaires et de limiter le relâchement des radionucléides pendant cette période.

Pour les colis de déchets C, l'objectif est d'interdire l'arrivée d'eau au contact du verre pendant plusieurs milliers d'années. Cette période concerne la phase thermique (c'est-à-dire la période durant laquelle la température au cœur du verre est supérieure à 50 °C) pendant laquelle les phénomènes d'altération du verre par l'eau sont accélérés. *La conception proposée repose sur un conteneur en acier de forte épaisseur.*

Pour les combustibles usés, il est proposé un conteneur en cuivre dont l'étanchéité peut être maintenue pendant une très longue durée (jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années). En effet, contrairement aux déchets C, les radionucléides ne sont pas piégés au sein d'une matrice de confinement (une fraction des radionucléides est relâchée dès l'arrivée de l'eau et le reste progressivement à mesure de la dissolution de la matrice d'oxyde d'uranium). Cette option s'appuie sur le concept « KBS-3 » avec conteneur en cuivre adopté en Suède (SKB) et en Finlande (Posiva). Elle est retenue par l'Andra au stade d'une conception générique. Des données de site permettraient de réviser cette option, si l'agencement de l'architecture à la fracturation du massif granitique et les dispositions ouvragées (remblais, scellements) permettent des temps de transfert suffisamment longs dans le milieu géologique pour assurer la décroissance radioactive des radionucléides.

3.3 Limiter les perturbations du granite par le stockage

La conception d'un stockage vise à mobiliser les propriétés favorables d'un granite. Il faut ainsi s'assurer que la réalisation du stockage et son évolution à long terme ne perturbent pas de façon préjudiciable les propriétés du milieu granitique. Les différentes dispositions étudiées concernent le dimensionnement des ouvrages, le choix des matériaux des composants ouvragés et le processus de stockage.

3.3.1 Un dimensionnement limitant les perturbations mécaniques et thermiques

Le granite est une roche mécaniquement résistante. Les ouvrages (galeries, alvéoles) sont dimensionnés pour assurer leur stabilité mécanique à long terme.

La chaleur dégagée par les déchets C et, le cas échéant, par les combustibles usés entraîne un échauffement dans les alvéoles et le granite encaissant. Pour maîtriser les phénomènes thermiques induits, l'objectif est de maintenir une température inférieure à 100 °C dans les alvéoles (donc dans la roche). Pratiquement, on a retenu une température maximale de 90 °C au point le plus chaud des barrières ouvragées d'argile gonflante des alvéoles de déchets C et en surface des conteneurs en cuivre de combustibles usés.

Les paramètres essentiels permettant de dimensionner les architectures de stockage pour limiter la température sont le nombre de colis de stockage par alvéole et l'écartement des alvéoles de stockage entre elles. L'emprise des zones de stockage de déchets C et de combustibles usés est essentiellement subordonnée à ces considérations thermiques et à la puissance thermique dégagée par les colis lors de leur mise en stockage.

3.3.2 Un processus de stockage limitant les perturbations hydrogéologiques et hydrogéochimiques du massif granitique hôte des installations souterraines

L'excavation des installations souterraines draine les eaux du granite et en perturbe l'hydrogéologie initiale. Le granite étant très peu perméable, ces perturbations affectent essentiellement les failles et les fractures les plus conductrices d'eau. Aussi, pour limiter le drainage des eaux du granite et, en corollaire, les quantités d'eau d'exhaure durant l'excavation des installations souterraines, on peut envisager de recourir à des techniques d'injection pour les failles et fractures les plus conductrices d'eau recoupées par les ouvrages.

Après une phase transitoire de perturbations liées aux excavations des installations souterraines, un équilibre entre le drainage des eaux et une réalimentation se met en place dans le massif granitique.

La gestion adéquate, en fonction du contexte hydrogéologique du granite, de l'excavation des zones de stockage, de leur exploitation, puis de leur fermeture constitue alors un moyen de limiter les perturbations hydrogéologiques et hydrogéochimiques du granite.

3.4 L'adaptation des dispositions de conception aux fonctions de sûreté à long terme

Les différentes options proposées contribuent à l'une et/ou l'autre des fonctions majeures d'un stockage :

- la fonction « *s'opposer à la circulation d'eau dans le stockage* » est essentiellement assurée par des dispositions architecturales et de scellement. L'architecture du stockage est adaptée à la fracturation du granite,
- la fonction « *limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage* » est plus particulièrement remplie par les dispositifs mis en place près des colis afin d'assurer, en permanence, des conditions d'environnement favorables à la protection des déchets et à l'immobilisation des radionucléides relâchés,
- la fonction « *retarder et atténuer la migration des éléments radioactifs* » mobilise l'ensemble des dispositions techniques retenues dans les options de conception : dimensionnement des ouvrages, choix des matériaux des ouvrages et colis.

L'étude de la conception d'un stockage en milieu granitique

Principes de conception	Dispositions techniques	Fonctions de sûreté		
		S'opposer à la circulation d'eau dans le stockage	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Retarder et atténuer la migration des radionucléides
Mobiliser les propriétés favorables du milieu granitique	Architecturales Implanter les alvéoles dans la roche granitique très peu perméable	XXX	X	XX
	Implanter les modules dans des "blocs" à l'abri des failles conductrices d'eau	XXX	X	XX
	Implanter le stockage à l'écart des failles régionales	XXX	X	XX
	Processus de stockage Caractérisation à l'avancement des "blocs" de granite	XXX	X	XX
Concevoir des composants ouvragés complémentaires et redondants avec le milieu granitique	Architecturales Un scellement multiple des ouvrages (alvéoles, modules, galeries, ouvrages de liaison surface-fond)	XXX	XX	XXX
	Matériaux Un environnement physico-chimique favorable aux colis et aux déchets : barrières ouvragées et colisages adaptés aux types de déchets		XXX	X
	Des colis de stockage (conteneurs, surconteneurs...) étanches ou très peu perméables pendant une durée suffisamment longue en fonction du type de déchets		XXX	XX
Limiter les perturbations du granite par le stockage	Dimensionnelles Un dimensionnement des ouvrages assurant leur stabilité mécanique à long terme	XXX		XXX
	Un dimensionnement thermique des ouvrages permettant de maîtriser les phénomènes induits par l'échauffement des ouvrages		X	
	Matériaux Des colis de stockage et des barrières ouvragées dont l'altération ne perturbe pas significativement les propriétés de rétention du granite			XXX
	Processus de stockage Un processus de stockage géré de façon à limiter les perturbations des caractéristiques hydrogéologiques et hydrogéochimiques du granite	XXX	XX	XXX

Dispositions techniques et fonctions de sûreté à long terme d'un stockage en milieu granitique. Contribution de la disposition technique à la fonction : XXX : essentielle ; XX : importante ; X : accessoire

3.5 La prise en compte de la réversibilité

Outre la sûreté en exploitation et à long terme, *la conception du stockage doit répondre à l'exigence de réversibilité*. La réversibilité renvoie à une gestion « prudente », par étapes successives, d'un éventuel stockage qui, compte tenu des échelles de temps considérées, laisse les choix ouverts aux générations suivantes.

L'exigence de réversibilité implique au fil du temps une présence humaine, une surveillance et des actions de maintenance qui ne s'opposent en rien à la sûreté à long terme, objectif primordial du stockage. Au contraire, par une gestion prudente et progressive du processus de stockage, la réversibilité peut contribuer à améliorer la confiance en la sûreté à long terme.

L'exigence de réversibilité a été placée au centre des analyses sur l'étude d'un éventuel stockage en milieu granitique. La démarche de conception retenue par l'Andra a visé à proposer des options génériques de conception répondant à l'exigence de réversibilité.

Au-delà de *la capacité à retirer des colis stockés* (la « récupérabilité »), la réversibilité peut être définie comme la possibilité d'un pilotage progressif et flexible d'un stockage qui laisse aux générations futures une liberté de décision. Dans cette optique, le processus de stockage peut être décomposé en une succession d'étapes à franchir qui ménage, de la réalisation des premiers modules jusqu'à la fermeture éventuelle d'un module ou d'une zone de stockage, la possibilité d'un temps d'attente et d'observation, avant de décider de passer à l'étape suivante ou de revenir en arrière. Le franchissement d'une étape n'est pas un choix définitif, mais un choix raisonné, opéré en toute connaissance ; c'est-à-dire en connaissance des paramètres scientifiques, techniques, économiques, sociaux et environnementaux et des conséquences que le passage d'une étape à une autre peut introduire.

Dans cette perspective, la conception d'un stockage prend en compte la réversibilité sous trois aspects :

- des dispositions architecturales favorisant un pilotage progressif d'un stockage,
- des dispositions techniques permettant le retour en arrière aux différentes étapes du stockage,
- des moyens d'observer l'état d'un stockage et son évolution à tout moment du processus.

3.5.1 Des architectures de stockage intégrant et favorisant la réversibilité

Simplicité et robustesse des concepts, durabilité des matériaux, modularité : les architectures de stockage proposées par l'Andra intègrent l'exigence de réversibilité et en facilitent la mise en œuvre.

• Des concepts de stockage simples et robustes

Les concepts proposés par l'Andra à ce stade des études sont, par principe, simples et robustes. La simplicité renvoie au souci de faisabilité technique ainsi qu'à la maîtrise du comportement. En particulier, on tire profit de la résistance mécanique de la roche granitique pour limiter les dispositifs de soutènement dans la conception des ouvrages. La simplicité des options proposées par l'Andra facilite la description de l'évolution de ces concepts dans le temps ainsi que leur modélisation. La robustesse renvoie, quant à elle, à la résistance des concepts du point de vue de la sûreté ainsi qu'aux connaissances scientifiques mobilisées.

• Des matériaux durables et des dispositifs pour faciliter le retrait éventuel des colis

Le souci de faciliter la récupération des colis par les générations futures a conduit l'Andra à privilégier des matériaux durables pour les colis et les ouvrages (béton, acier, etc.), leur maintien en état étant la condition de base de la réversibilité. Leur durabilité dans un environnement de stockage peut être estimée à plusieurs siècles.

En outre, plusieurs dispositions concourent à faciliter la gestion réversible du stockage et l'éventuel retrait des colis : par exemple, regroupement des colis en surconteneurs standardisés, dispositifs de manutention identiques pour la mise en place et le retrait des colis, aménagement de jeux de manutention entre les colis et/ou entre le colis et les parois de l'alvéole de stockage.

• Une modularité des installations souterraines pour une gestion souple et une évolution de la conception

Les architectures proposées sont modulaires, c'est-à-dire qu'elles permettent une gestion souple du stockage, par exemple la construction et l'exploitation par étapes, ce qui facilite en outre l'intégration du retour d'expérience.

L'étude de la conception d'un stockage en milieu granitique

Chaque catégorie de colis (B, C et CU) est accueillie dans une zone de stockage dédiée, construite, exploitée et fermée de façon indépendante. Chaque zone de stockage est conçue pour être construite et exploitée progressivement en sous-ensembles successifs d'alvéoles. La fermeture conçue, comme l'exploitation, de manière progressive, s'organise en plusieurs étapes : fermeture de sous-ensembles d'alvéoles, qui peut être menée parallèlement à la création de nouveaux sous-ensembles, fermeture des accès à ce sous-ensemble, puis des installations de stockage de la catégorie de déchets concernée, et enfin de l'ensemble des installations.

Au fur et à mesure du développement du stockage par étapes, les nouveaux ouvrages peuvent être conçus en bénéficiant de l'expérience et des connaissances acquises au cours de l'exploitation et de l'observation des ouvrages antérieurs, ainsi que des progrès techniques réalisés par ailleurs. Il est aussi possible d'intégrer des données provenant de l'environnement social, technique et scientifique.

3.5.2 La faisabilité technique d'un retour en arrière

L'Andra a étudié la faisabilité technique d'un retour en arrière aux différentes étapes du stockage : moyens technologiques, conditions opératoires et précautions nécessaires.

Le stockage est ainsi conçu pour permettre, dans la première étape, un retrait des colis par simple inversion du processus de mise en alvéole (comme dans un entreposage). Pour les étapes ultérieures, l'Andra a intégré des dispositions pour pouvoir accéder de nouveau aux installations qui ont été fermées et installer les équipements nécessaires au retrait des colis si cela était décidé.

3.5.3 Un programme d'observation en support à la gestion réversible du stockage

Conserver les possibilités de choix au cours du processus de stockage implique de connaître son évolution et sa situation à tout moment, donc de l'observer et de mettre en place les moyens et dispositifs de mesures nécessaires. L'Andra a étudié les possibilités d'intégrer des capteurs de mesures dans les ouvrages sans en perturber le fonctionnement, ni la sûreté du stockage.

Au-delà des mesures de surveillance liées à la sûreté opérationnelle, ce programme d'observation vise à vérifier que le fonctionnement du stockage reste conforme aux prévisions, à proposer au besoin des actions pour préserver les différents choix de gestion, à tirer le retour d'expérience pour améliorer la conception et la gestion du stockage. Les données ainsi acquises contribueront aussi à améliorer la modélisation et à accroître la fiabilité des prévisions.

À l'étranger : consensus sur une approche par étapes

Une action concertée menée dans le cadre de l'Union européenne a montré la pertinence d'un découpage du processus de stockage en étapes pour appréhender la réversibilité et fournir un cadre progressif à la prise de décision.

L'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE a aussi, en 2002, souligné que l'approche de la réversibilité par étapes successives, suivant un processus prudent et souple, fait partie des « bonnes pratiques ». L'AEN insiste également sur la nécessité de mettre en place des dispositions d'ordre institutionnel, organisationnel, réglementaire, politique et financier, en complément des mesures techniques, pour mettre en œuvre la récupérabilité et la réversibilité du stockage.

Aux États-Unis, la démarche par étapes présentée par le National Research Council (NRC) offre aux décideurs l'éventail de choix le plus large possible à chaque étape et peut être rapprochée de celle proposée par l'Andra. Le NRC met en avant les avantages techniques mais aussi sociaux, politiques et économiques de cette approche par rapport à une démarche « linéaire ».

Dossier 2005 Granite

Comprendre et modéliser le granite

3

p.52 > **1. La reconnaissance d'un site granitique**

p.54 > **2. La modélisation géologique**

p.64 > **3. Les modélisations hydrogéologiques, hydrogéo-chimiques
et les simulations de transfert**

p.75 > **4. La modélisation géomécanique**

p.79 > **5. Prendre en compte l'évolution géodynamique
et climatique à très long terme : la géoprospective**

Le granite, comme formation géologique hôte d'un stockage, induit, par sa structure et ses propriétés, des contraintes particulières pour la conception d'un stockage. Il faut donc reconnaître et caractériser un site avec suffisamment de précision pour pouvoir adapter les dispositions de conception à la structure et aux propriétés du massif granitique étudié.

1 La reconnaissance d'un site granitique

Les travaux de reconnaissance d'un massif granitique visent à recueillir les données de site et à élaborer les modèles pour concevoir l'architecture d'un stockage et en démontrer l'adéquation avec les objectifs de sûreté et de réversibilité. Ils s'effectuent en plusieurs étapes au travers d'une démarche itérative en lien avec les études de conception et les analyses de sûreté.

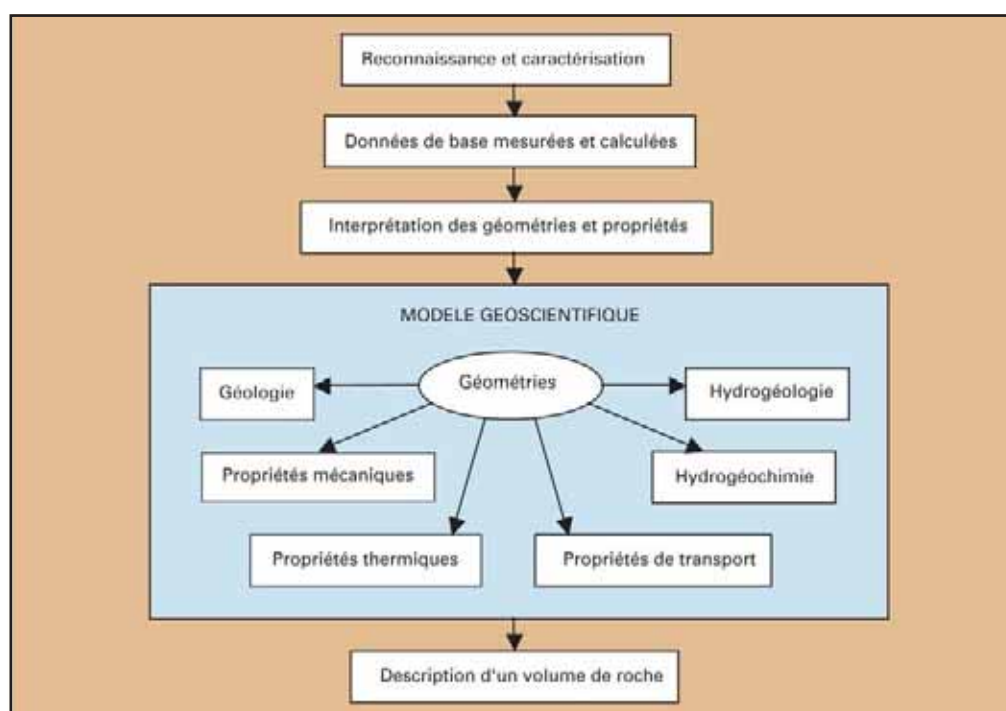
Ceci permet d'ajuster, à chaque étape, les concepts de stockage au site étudié et de réduire les incertitudes à prendre en compte dans les analyses de sûreté.

1.1 Les objectifs de la reconnaissance d'un site granitique

La description géologique d'un massif granitique se fonde sur l'intégration des données relatives à la structure du granite étudié, notamment sa fracturation, et à la nature minéralogique et géochimique des roches qui le composent.

Les propriétés hydrogéologiques et hydrogéochimiques du massif sont aussi des éléments essentiels de la caractérisation d'un site granitique. Elles concernent à la fois le contexte hydrogéologique général du site, les paramètres hydrauliques contrôlant la circulation de l'eau dans les fractures et les facteurs hydrogéochimiques conditionnant le transfert et la rétention de radionucléides.

Les propriétés géomécaniques et thermiques du granite sont également des éléments nécessaires au dimensionnement d'un stockage ; elles doivent être caractérisées tout au long des travaux de reconnaissance.



La compréhension d'un granite

Le recueil des données de site constitue le premier temps de la caractérisation d'un site granitique. Dans un second temps, leur intégration passe par l'analyse de leur cohérence entre les différentes disciplines mobilisées et l'élaboration de modèles représentant la distribution des propriétés du granite :

- *modèles géologiques* représentant en trois dimensions la structure du massif granitique étudié et sa fracturation,
- *modèles hydrogéologiques et hydrogéo-chimiques* pour simuler les circulations d'eau dans les fractures du granite ainsi que le transfert et la rétention de radionucléides,
- *modèles géomécaniques* décrivant le contexte géomécanique du site et le comportement du granite en réponse aux perturbations, notamment thermiques, causées par un stockage.

1.2 Une démarche par étapes

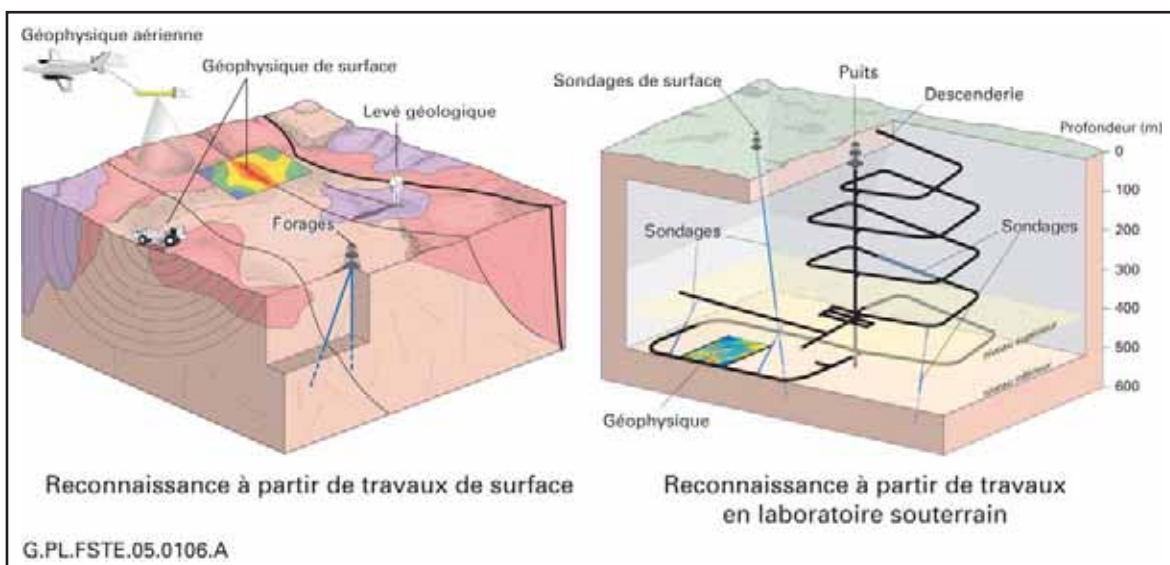
Caractériser les propriétés d'un granite implique une démarche et des techniques qui prennent en compte le large volume de roche à reconnaître et les spécificités d'un milieu fracturé. Ceci nécessite des travaux à différentes échelles, en surface comme en profondeur.

Certaines caractéristiques du granite ne peuvent, avec les techniques disponibles, être caractérisées directement à partir de la surface. Ainsi, la distribution exacte de la fracturation ne peut être déterminée qu'*in situ* en profondeur. Les techniques mobilisées à partir de la surface permettent, avant d'accéder en profondeur, d'élaborer des modèles de distribution réalistes de la fracturation qui seront ultérieurement affinés *in situ*.

Avant la réalisation d'un éventuel stockage, la démarche de reconnaissance d'un site consiste à préciser progressivement la connaissance d'un granite au travers de deux étapes principales :

- *une reconnaissance de surface* afin d'élaborer des modèles nécessaires pour une première évaluation de l'adéquation du site étudié à l'implantation d'un stockage. L'absence de caractéristiques de site rédhibitoires est vérifiée sur la base d'études de conception et d'analyses de sûreté. Cette étape vise également à préciser l'implantation et le programme de recherche d'un laboratoire souterrain permettant une caractérisation *in situ* en profondeur du granite,
- *une qualification au moyen d'ouvrages souterrains* pour évaluer l'adéquation du site à un stockage. Les travaux consistent à préciser les modèles géologiques, hydrogéologiques et géomécaniques du site granitique ainsi que les modèles de transfert et de rétention des radionucléides dans les fractures. La qualification du site se fonde sur les études de conception et les analyses de sûreté. Il en résulte notamment des critères d'implantation des ouvrages de stockage dans la roche granitique.

Au cours de la réalisation du stockage, l'ajustement exact de l'architecture du stockage aux caractéristiques du site, notamment à la fracturation du granite et aux critères définis pendant l'étape précédente, nécessite des travaux de reconnaissance et de caractérisation « à l'avancement ».



Étapes de reconnaissance de surface et de qualification en laboratoire souterrain

2 La modélisation géologique

La modélisation géologique d'un site a pour objectif de représenter en trois dimensions (3D) et à différentes échelles la structure du granite étudié. Les modèles géologiques servent de support aux autres modélisations du site (hydrogéologiques, hydrogéo-chimiques et géomécaniques) ainsi qu'à la simulation des transferts éventuels de radionucléides dans le granite permettant d'évaluer les performances du stockage.

2.1 Quels objets géologiques ?

Un massif granitique est une formation géologique composite qui résulte d'une histoire géologique en plusieurs étapes :

- la genèse, la mise en place et la cristallisation du magma granitique à des profondeurs variables selon le type de granite,
- une ou plusieurs phases de déformation et de fracturation pendant et après la mise en place du granite,
- la remontée du bâti géologique et l'érosion des terrains sus-jacents au granite entraînant son « affleurement » en surface.

Chaque phase de cette histoire géologique a des conséquences sur la composition et la structure d'un massif. La roche elle-même, sa nature géochimique, sa minéralogie ainsi que son homogénéité, témoignent de l'histoire originelle du granite et des phases de solidification.

La mise en place du granite et les phases de déformation sont accompagnées de circulations de fluides hydrothermaux caractérisées par des transformations minéralogiques de la masse du granite ou de ses fractures. La structure et la fracturation du granite sont les indices des différentes phases de déformation tectonique subies par un massif pendant et après la mise en place et la cristallisation du granite.

Des roches, plus ou moins issues du magma ayant donné naissance au granite, recoupent souvent sous forme de filons la roche granitique : aplites au grain fin, pegmatites aux minéraux de grande taille, dolérites de composition basique... Elles sont autant de témoins des différentes phases de l'histoire du massif et constituent souvent des guides pour la modélisation de la structure du massif granitique étudié.

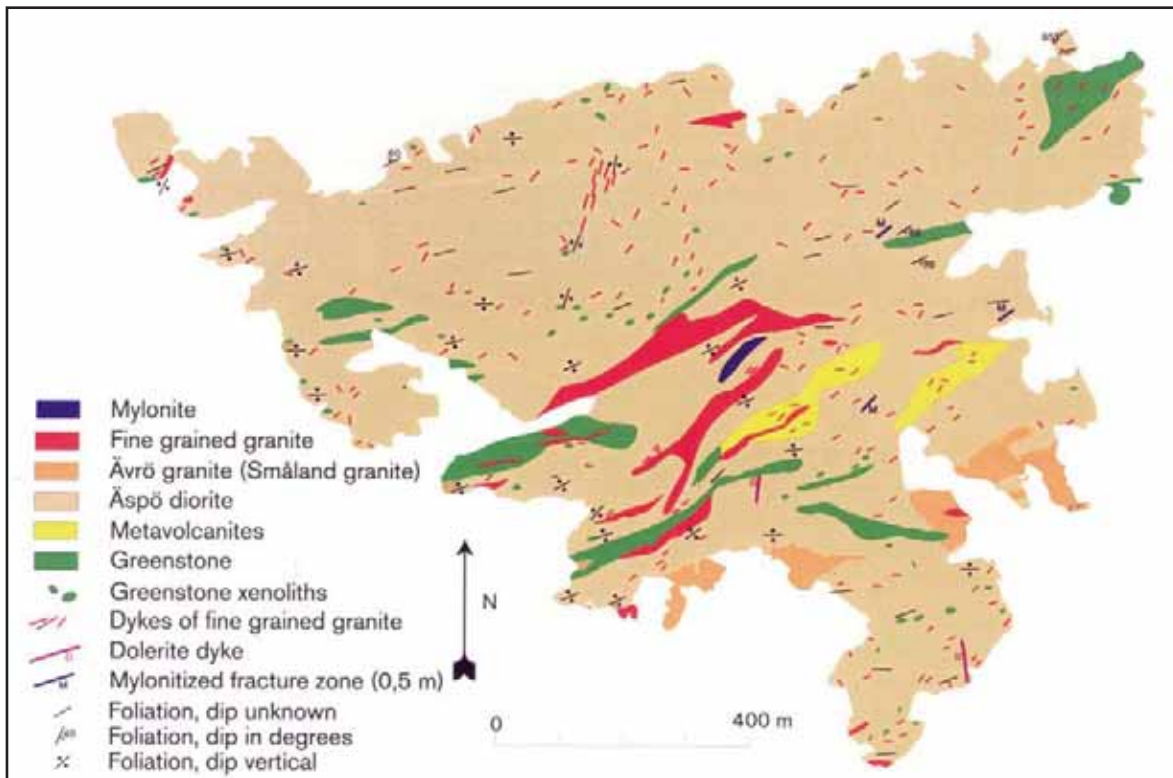
Les parties superficielles du granite sont également un élément important de la structure d'un massif. Résultat des phénomènes d'érosion ayant entraîné l'affleurement du granite en surface, elles sont altérées et généralement beaucoup plus perméables que le granite en profondeur. Elles peuvent constituer un réservoir d'eaux pluviales qui alimentent le système hydrogéologique du granite en profondeur (cf 3.3.)

Chacun de ces éléments constitue une composante du modèle géologique à établir et à préciser lors des étapes successives de reconnaissance et de caractérisation d'un granite.

2.1.1 La roche granitique

Un massif granitique est, le plus souvent, composite, c'est-à-dire que la roche qui le constitue varie dans sa nature minéralogique d'un point à l'autre du granite. Ceci s'explique par des origines premières différentes des magmas ou par des phénomènes de différenciations au cours de la mise en place et de la solidification du granite.

À l'échelle du massif, la modélisation consiste à définir les grands ensembles granitiques composites du massif. Par exemple, le massif granitique de Charroux-Civray, dans le département de la Vienne, étudié par l'Andra de 1994 à 1996 a pour origine des magmas de différentes natures qui se sont assemblés lors de la mise en place du massif. De façon semblable, le laboratoire d'Äspö en Suède est implanté dans un massif composé de deux types de granite dominants : le granite d'Ävrö et la granodiorite d'Äspö.



Carte géologique d'Äspö

A l'échelle du stockage, la modélisation consiste à représenter, en trois dimensions (3D), les relations entre les différents composants du massif. Elle sert à identifier en quoi les différences de nature entre composants du granite peuvent intervenir sur la conception d'un stockage et les analyses de sûreté. Il s'agit par exemple de vérifier si les différences minéralogiques modifient significativement les propriétés thermiques ou hydrauliques de la roche et d'apprécier si la fracturation varie selon la nature des différents composants. Leurs contacts sont, de ce point de vue, des marqueurs importants. Ces observations sont, en retour, des indications de l'intensité des déformations subies par la roche.

L'intégration des données aux différentes échelles contribue à la compréhension de l'histoire géologique du granite. Leur cohérence est un gage de robustesse des modélisations géologiques 3D.

2.1.2 La fracturation du granite

Résultat de sa genèse et de son histoire géologique, le granite est un milieu fracturé. Les fractures sont les lieux des écoulements des eaux dans le granite. Elles sont ainsi les vecteurs potentiels du transfert de radionucléides du stockage vers l'environnement. Leur détection et leur représentation en 3D sont un objectif essentiel de la modélisation géologique.

• Les échelles de fracturation

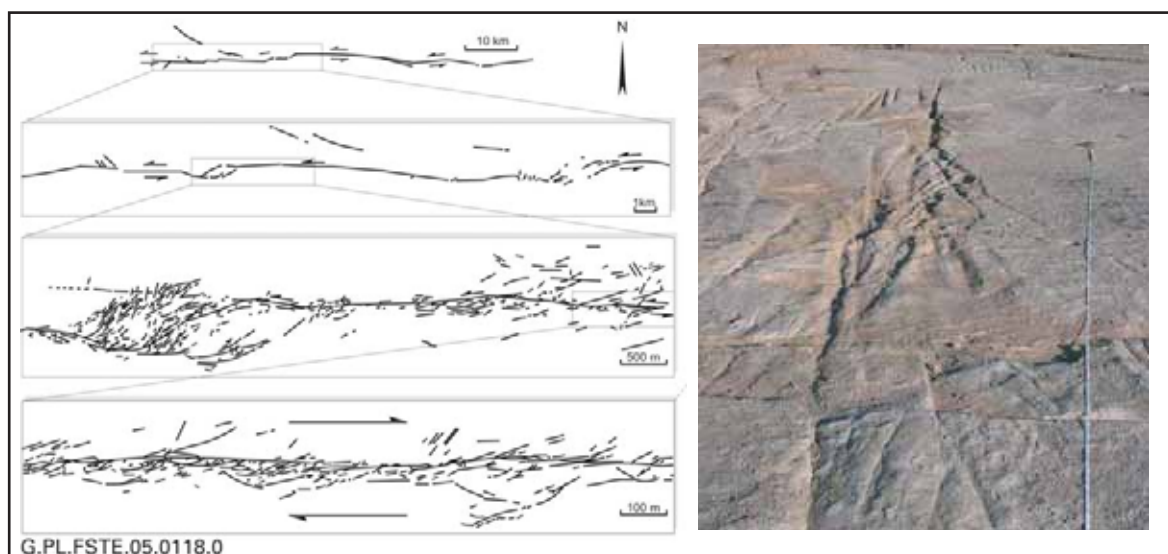
La fracturation du granite s'observe à des échelles très différentes : depuis l'échelle crustale qui concerne les grandes failles structurant le bâti du sous-sol, jusqu'aux micro-fractures à l'échelle du minéral et observées au microscope.

LONGUEUR	DOMAINE DE FRACTURATION	ANALYSE	TYPLOGIE	
>100 km	GRANDE FRACTURATION	DETERMINISTE	Failles crustales	
10 km			FRACTIONNEMENT REGIONALE	Failles régionales
1 km			FRACTIONNEMENT LOCALE	Failles locales
1 hm	MOYENNE FRACTURATION	limite fonction du stade de reconnaissance	Failles hectométriques	
1 dam			FRACTIONNEMENT HECTOMETRIQUE	joint diaclasses petites failles fentes et fissures
1 m	PETITE FRACTURATION	STATISTIQUE		
1 dm				
1 cm	MICROFRACTURATION		microfractures microfissures	
1 im				

Échelles de fracturation du granite

La grande et la petite fracturation se distinguent aussi par la façon dont elles sont traitées, de façon déterministe ou statistique :

- les *petites fractures* résultent du « retrait » thermique lors de la solidification du magma ou des phases de déformation ultérieures. Elles sont, hors les zones de fortes déformations du granite, généralement très peu conductrices d'eau. La caractérisation et la modélisation de la petite fracturation relèvent d'une approche statistique. Les modèles de fracturation sont établis à partir de levés géologiques systématiques qui donnent les lois de distribution de leurs principales caractéristiques dans le granite : taille, orientation et pendage,
- les *grandes fractures, ou failles*, résultent toujours de déformations significatives du massif granitique au cours des phases tectoniques. Elles sont souvent composites de plusieurs fractures, d'ordre inférieur. Le mode et l'intensité de la fracturation peuvent varier d'un point à l'autre d'un massif et d'un massif à l'autre, ce qui entraîne des modèles divers de fracturation découpant le massif granitique en « blocs » de forme variée. Pour leur détection et leur modélisation, les grandes fractures et failles relèvent d'une démarche déterministe lors des phases de reconnaissance : elles sont généralement suffisamment grandes pour être identifiées une par une et constituer les éléments structurants de la modélisation du granite,



Détails de la structure d'une grande faille à différentes échelles

- *Le traitement de la fracturation « moyenne »* fait transition entre ces échelles de fracturation. Son traitement va évoluer au fur et à mesure de la reconnaissance d'un site granitique. Traitée de façon statistique dans les premières étapes, elle relève d'une approche déterministe lors des phases précisant la structure du granite à l'échelle d'un module de stockage. C'est particulièrement le cas pendant les travaux de reconnaissance à l'avancement pendant le stockage.

• **La minéralogie des failles et des fractures**

Les failles résultent de la rupture de la roche par cisaillement, ce qui induit glissement et écrasement partiel. Les failles sont ainsi composées d'éléments de la roche granitique écrasée (« bréchifiée ») voire transformée en argile (« gouge argileuse ») selon l'intensité de la déformation. Par ailleurs, les circulations de fluides hydrothermaux qui accompagnent les phases de création de fractures du granite y entraînent la précipitation de minéraux spécifiques. La composition minéralogique des remplissages des fractures témoigne des différents événements qui sont à l'origine du granite et des conditions physico-chimiques de sa structuration.

La modélisation de la fracturation distingue ainsi différentes familles de fractures selon leur géométrie et la minéralogie de leur remplissage.



Vue d'un plan de fracture

2.2 Les méthodes

Les techniques de reconnaissance d'un site granitique sont adaptées aux différentes étapes de la démarche et aux objectifs correspondants. Elles cumulent :

- levés géologiques par l'observation directe du granite soit sur affleurements en surface, soit sur carottes en forages, soit sur parois d'ouvrages souterrains,
- levés géophysiques qui fournissent des images du sous-sol à différentes échelles.

2.2.1 Les levés géologiques à partir de la surface ou en souterrain

La cartographie géologique de surface permet de compléter les cartes géologiques existantes par les levés d'affleurement, le traitement et l'interprétation des photographies aériennes, les images satellitaires et les modèles numériques de terrain. Elle sert de base à l'élaboration des modèles géologiques en 3D à partir de coupes géologiques interprétées.

Les carottes prélevées en forage réalisés à partir de la surface ou de galeries souterraines permettent de préciser les différents types de roches et leurs relations, et de mesurer la densité de la fracturation et ses caractéristiques (orientation, épaisseur, minéralogie...). Ces mesures constituent la base de l'analyse statistique de la petite fracturation.

Les levés géologiques d'ouvrages souterrains, galeries ou puits, précisent *in situ* les données de surface ou de forages, en particulier vis-à-vis de la variabilité de la roche et de la continuité des fractures en 3D.

2.2.2 Les méthodes géophysiques

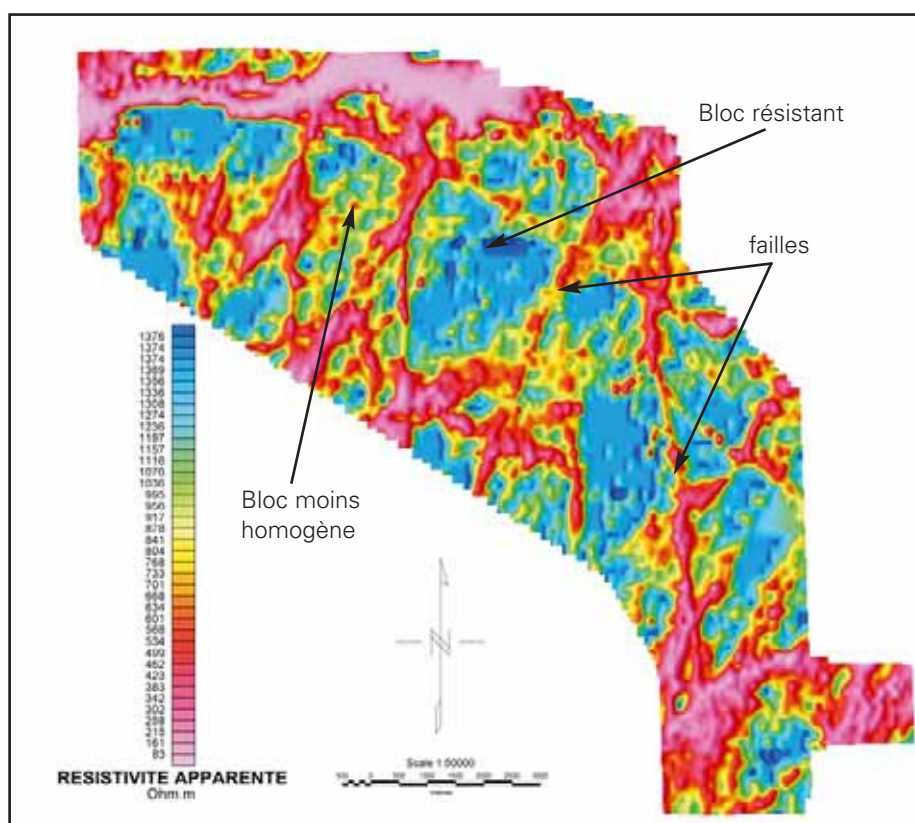
Les méthodes géophysiques aériennes constituent souvent, avec la cartographie de surface, les premiers outils mobilisés pour la reconnaissance d'un site. Elles se fondent sur la mesure de différentes propriétés du sous-sol : propriétés magnétiques, conductivité électrique, radioactivité.

Ces méthodes, dont les principales combinent en un seul vol les mesures d'aéromagnétisme, d'électromagnétisme et de radiométrie, permettent de couvrir de grandes surfaces rapidement et de manière homogène, et servent de support aux interprétations géologiques aux échelles régionale et locale.

Des levés géophysiques à partir de la surface sont effectués de manière moins extensive pour détecter à l'échelle locale les variations de nature de la roche et les hétérogénéités du milieu : présence de « blocs » homogènes de failles ou de fractures.

Les méthodes géophysiques souterraines, généralement plus complexes à mettre en œuvre qu'en surface, sont efficaces quand elles sont réalisées entre galeries et/ou forages. Ce sont, par exemple, des mesures radar ou sismiques.

La plupart des techniques mobilisées sont largement éprouvées. Elles bénéficient du retour d'expérience important de la prospection minière. C'est le cas des techniques de géophysique aérienne qui permettent de différencier rapidement des zones dont les propriétés physiques, en relation avec la lithologie et la fracturation, restent homogènes, ou varient rapidement. La figure ci-dessous montre un exemple de résistivité apparente d'un massif granitique déduite de données acquises par aéromagnétisme.



Carte aérienne de résistivité montrant le fractionnement en « blocs » d'un massif granitique par des failles (données COGEMA)

D'autres techniques ont fait l'objet de développements plus spécifiques pour les études de stockage, notamment les techniques de reconnaissance de la fracturation, qui fournissent une imagerie suffisamment précise du granite aux différentes échelles. Ainsi, l'Andra a testé avec Posiva, sur le site d'Olkiluoto en Finlande, différentes méthodes électriques, électro-magnétiques ou sismiques. Les tests ont permis d'évaluer la complémentarité de ces méthodes pour la détection de failles ou d'autres objets géologiques, comme le contact entre des roches de natures différentes. Ils ont précisé le champ d'application des méthodes à mettre en œuvre à partir de la surface, de forages ou d'ouvrages souterrains, aux différentes étapes de reconnaissance. L'applicabilité des méthodes testées en Finlande au contexte géologique français a été également vérifiée.

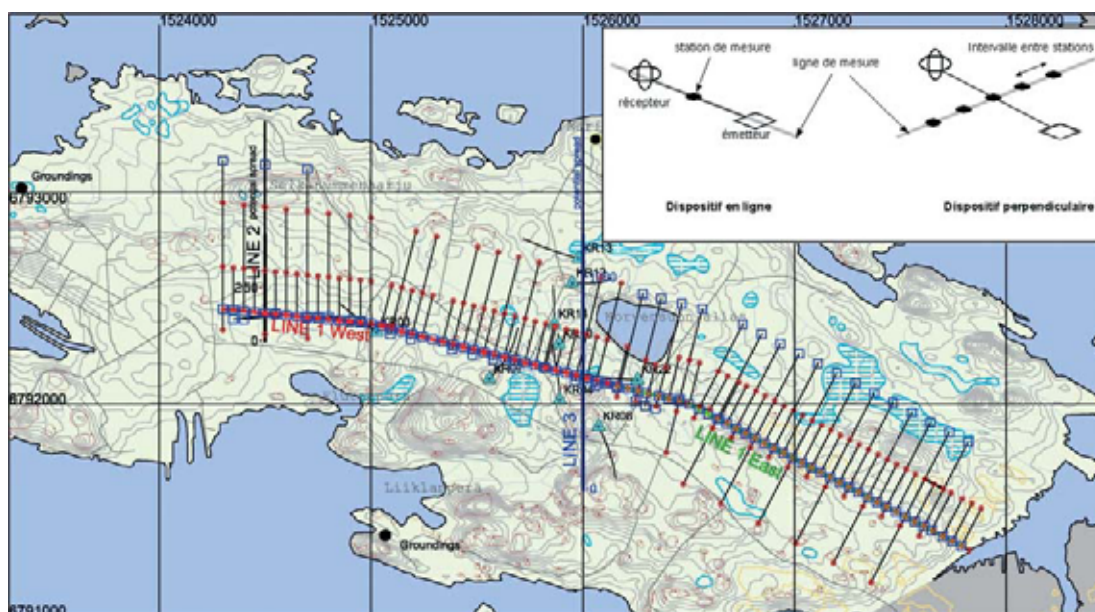
Le test de méthodes géophysiques avec Posiva en Finlande

Dans le cadre d'un accord de coopération signé en 2002 pour développer les méthodes de caractérisation d'un site cristallin à partir de la surface, l'Andra et Posiva ont réalisé, en 2002 et 2003, deux tests de méthodes géophysiques sur le site d'Olkiluoto : le premier concerne des méthodes électriques et électromagnétiques effectuées à partir de la surface, le deuxième des méthodes sismiques utilisant des forages profonds.

• Acquisition et interprétation conjointe de données électriques et électromagnétiques

Les travaux, qui combinent des mesures classiques de sondages électriques et des mesures d'électromagnétisme multifréquentiel, ont été réalisés pour explorer une tranche située entre 0 et 500 mètres de profondeur.

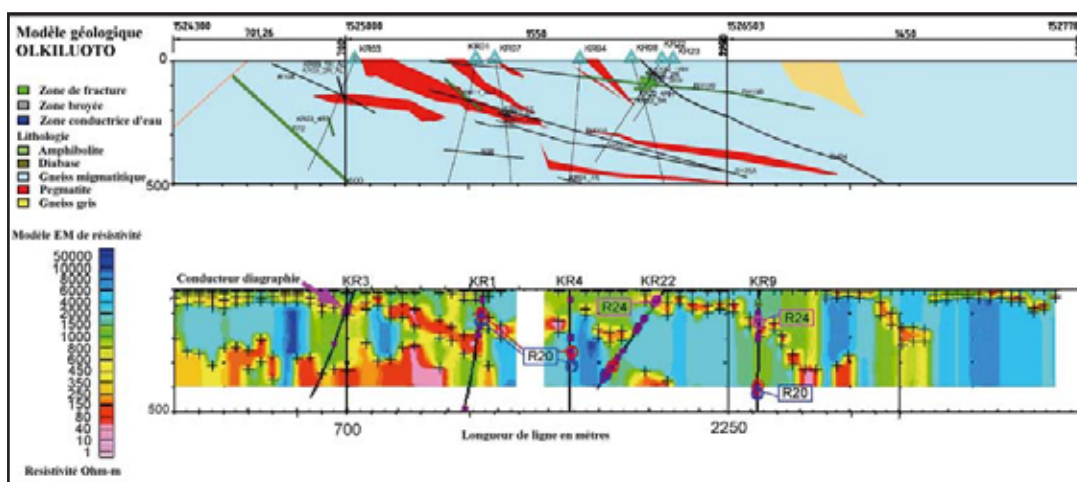
Les mesures électromagnétiques ont été faites sur un profil long de 3 400 mètres traversant l'île d'Olkiluoto selon deux configurations de la liaison émetteur-récepteur : l'une le long du profil, l'autre perpendiculaire au profil (figure ci-dessous). Pour couvrir au mieux la tranche 0-500 mètres, différentes distances entre émetteurs et récepteurs ont été retenues : 200, 500 et 800 m.



Localisation des profils de mesures électriques (LINE 1 West, LINE 1 East, LINE 2, LINE 3) et électromagnétiques (en ligne : carré bleu 200 m entre émetteur-récepteur, perpendiculaire : rouge 200 m, et 500 m, bleu clair 800 m) (quadrillage kilométrique). En encadré, le dispositif de mesure.

Les données électriques et électromagnétiques ont fait l'objet de traitements spécifiques et ont été interprétées, séparément dans un premier temps, puis conjointement. L'étape finale de l'interprétation a intégré les mesures de résistivité faites en sondage et la comparaison des données électriques et électromagnétiques avec les résultats des données géologiques et géophysiques antérieures.

...



Coupe géologique et résistivité du profil électromagnétique (200 m entre émetteur et récepteur, perpendiculaire à la ligne)

L'utilisation combinée de ces deux techniques est transposable sur les massifs granitiques français et permet une bonne cartographie d'un volume de roche entre 0 et 500 mètres. L'électromagnétisme multifréquentiel localise avec une bonne précision les failles horizontales ou à faible pendage et en évalue la continuité sur une plage de profondeur importante. Les mesures électriques montrent une bonne résolution jusqu'à 150-200 mètres, et sont notamment applicables pour caractériser la zone altérée superficielle des granites, généralement rencontrée pour les granites français.

• Acquisition et interprétation de données sismiques à partir de forages

Deux techniques sismiques ont été mises en œuvre : le WVSP et la tomographie.

- *Le walk away VSP (WVSP)*, profil sismique vertical multi offset, parfois dénommé « balade sismique », consiste à enregistrer à partir de récepteurs descendus dans un forage les ondes sismiques provoquées par une source déplacée à un pas régulier le long d'un profil en surface. La source sismique utilisée est un brise roche hydraulique modifié, contrôlé par ordinateur, monté sur une pelle excavatrice (photo ci-dessous à gauche). La chaîne de récepteurs des ondes sismiques descendue dans les forages est constituée de 8 géophones à 3 composants équipés de système d'ancrage (photo ci-dessous à droite) ; les géophones sont distants de 5 mètres.



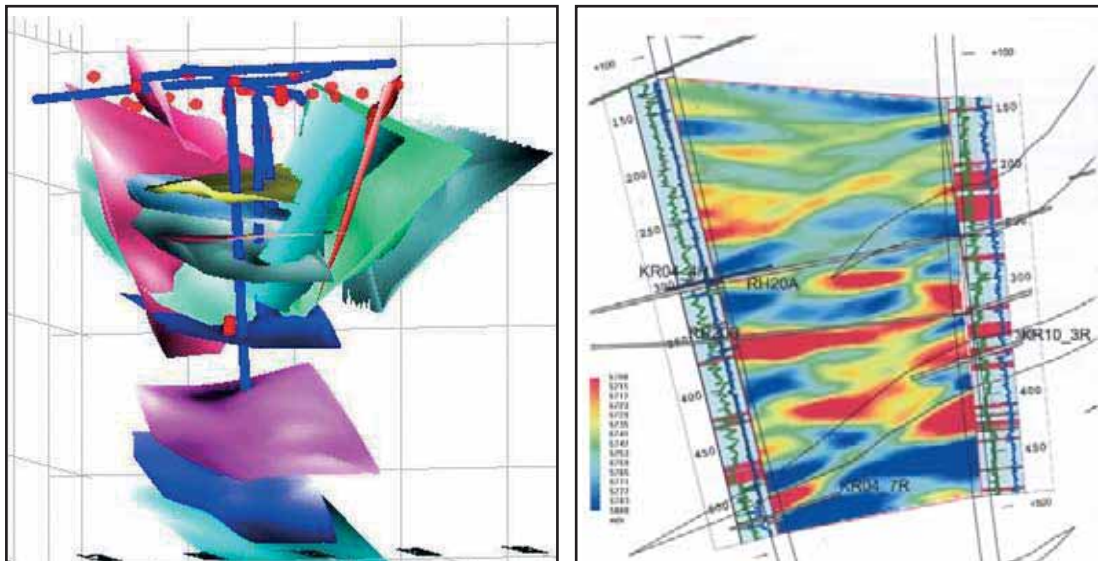
Source sismique (à gauche) et chaîne de 8 géophones avant descente dans un forage (à droite)

...

...

La densité et la position des récepteurs ont été déterminées pour reconnaître les failles ou contacts entre roches de nature différente à différentes profondeurs. Elles sont choisies en fonction de l'orientation et du pendage de ces objets géologiques sur lesquels se reflètent les ondes sismiques. Ainsi, quatre sondages ont été utilisés au total, et les sources déplacées sur trois lignes.

Le traitement et l'interprétation des mesures ont permis d'identifier une vingtaine de réflecteurs, principalement des contacts entre roche de nature différente ou des fractures et de les intégrer dans un modèle géologique cohérent (figure ci-dessous). Cette technique testée en Finlande est applicable à tous les milieux granitiques.



A gauche, interprétation des réflecteurs WVSP. A droite, tomogramme des vitesses sismiques entre les deux forages KR04 et KR10

- La tomographie sismique consiste à mesurer à partir de récepteurs descendus dans un forage les ondes sismiques provoquées par une source déplacée à pas régulier dans un autre forage, assez voisin. Les mesures ont été faites entre deux forages profonds dont la distance varie de 250 mètres environ près de la surface, à 150 mètres en profondeur.

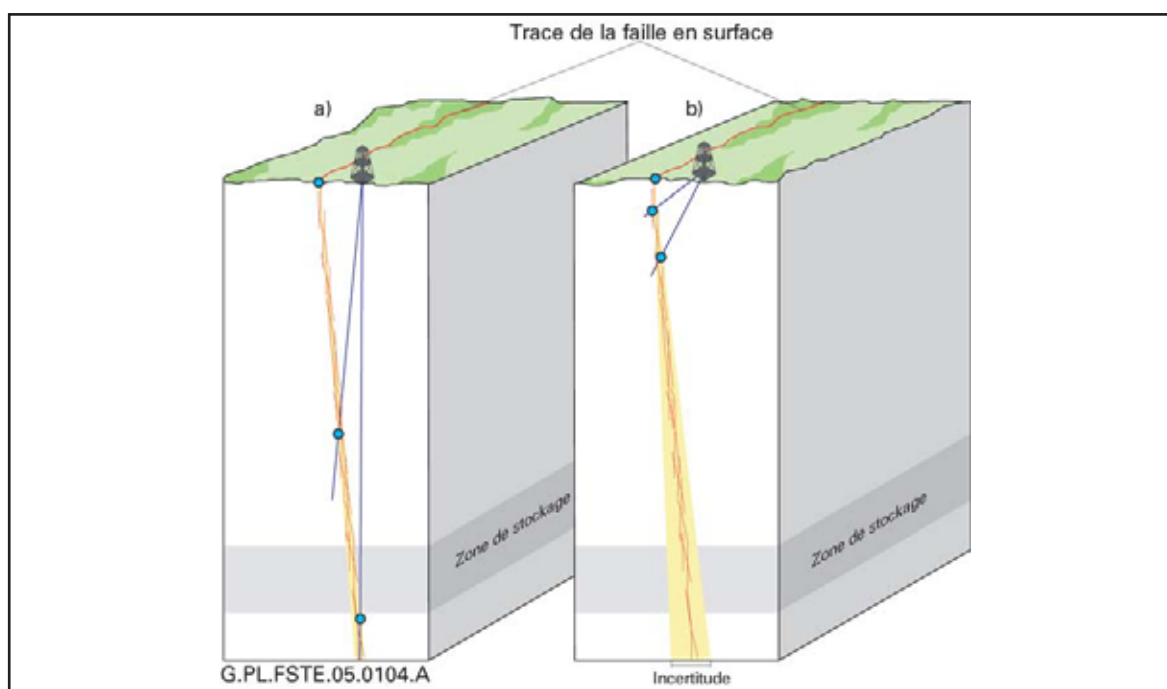
La source sismique, piézoélectrique, produit des signaux de haute fréquence ayant une pénétration significative dans le milieu, de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. Elle est déplacée tous les 2 mètres. Les récepteurs consistent en une chaîne de 30 capteurs piézoélectriques distants de 2 mètres. Après traitement des données, la comparaison du tomogramme de vitesse des ondes sismiques avec les données de forages permet d'établir la continuité ou non des failles détectées entre forages (figure ci-dessus).

Les tests ont montré que la technique est utilisable jusqu'à des distances entre forages de l'ordre de 250 mètres, ce qui permettrait d'optimiser le nombre de forages à réaliser à partir d'ouvrages souterrains.

2.3 L'intégration des données et le traitement des incertitudes

La modélisation géologique a pour principal objet de réaliser des modèles en 3D de la structure d'un granite, c'est-à-dire de la distribution dans le massif des différents objets géologiques qui le composent qu'il s'agisse de la roche elle-même ou des fractures.

Elle vise également, tout au long des étapes de reconnaissance, à identifier et évaluer les incertitudes associées aux modèles réalisés pour les réduire et, *in fine*, identifier les incertitudes irréductibles à prendre en compte dans les analyses de sûreté et la conception d'un stockage. Par exemple, le dessin complet et précis d'une faille n'est jamais totalement accessible en 3D : il faut donc, pour concevoir un stockage, définir les marges de confiance associées à la modélisation d'une telle structure (figure ci-après).



Incertitude sur le tracé d'une faille en fonction des données de forage : a) à partir de forages profonds. b) à partir de forages superficiels

En ce sens, la cohérence des observations et des modèles établis à différentes échelles est un élément clé de l'interprétation des données de terrain et de leur intégration dans un modèle 3D.

In fine, la compréhension des objets géologiques composant le modèle, c'est-à-dire la cohérence de leur intégration dans l'histoire géologique du granite, est indicatrice de la robustesse du modèle. Elle s'appuie sur des études fondamentales et spécifiques impliquant souvent des travaux au-delà du périmètre du site étudié.

2.3.1 L'apport des études fondamentales

Comprendre la signification des différentes unités de roche ou des fractures composant le modèle géologique d'un massif granitique implique de les replacer dans l'histoire du granite depuis sa genèse jusqu'à la période actuelle.

Les questions les plus souvent examinées touchent à la composition minéralogique et chimique des roches, indicateurs de l'origine des magmas. L'interprétation nécessite par exemple des mesures d'âge ou des analyses géochimiques isotopiques pour différencier les familles magmatiques.

L'analyse des fractures et des différentes phases tectoniques qui leur ont donné naissance est également un sujet important d'étude pour la compréhension de l'histoire du granite. Comprendre comment les fractures se sont formées et à quels épisodes de l'histoire du granite se rapportent les minéraux qui les composent permet d'extrapoler, à bonne échelle, des données recueillies en des points d'observations ou de mesures particuliers : affleurements de roches en surface, forages, levés géologiques en souterrain.

La compréhension du colmatage des fractures par des minéraux résultant de la circulation ancienne de fluides hydrothermaux est ainsi un point systématiquement étudié lors de la reconnaissance de massifs granitiques. L'évaluation de l'importance de l'extension et de la chronologie de ce type de phénomènes est importante pour apprécier la perméabilité de la roche granitique. Des travaux sur les granites hercyniens français (en particulier ceux réalisés par le groupement de recherche FORPRO du CNRS) ont ainsi précisé la chronologie et l'extension des phénomènes de circulations hydrothermales constatés dans l'ouest du Massif Central ainsi que dans le Massif Armoricain et fixé un cadre général à ce type d'études sur un site particulier.

2.3.2 La modélisation en 3D et les outils de visualisation

Les progrès de l'informatique ont très largement augmenté les possibilités de modélisation et de visualisation en 3D de la structure d'une formation géologique, en particulier du granite et de sa grande fracturation.

La multiplicité des angles de vue que les outils informatiques proposent est un élément facilitant la vérification de la cohérence des levés géologiques et géophysiques faits de façon complémentaire et à différentes échelles.

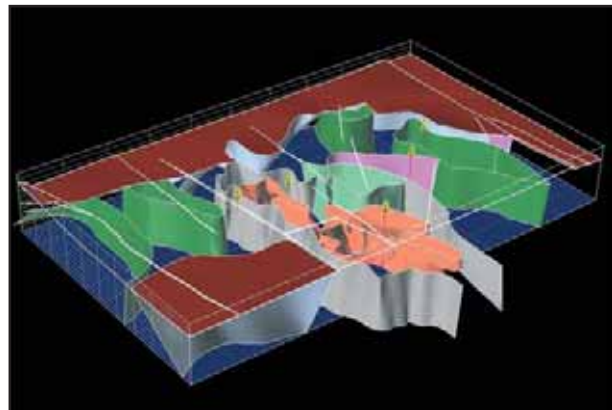
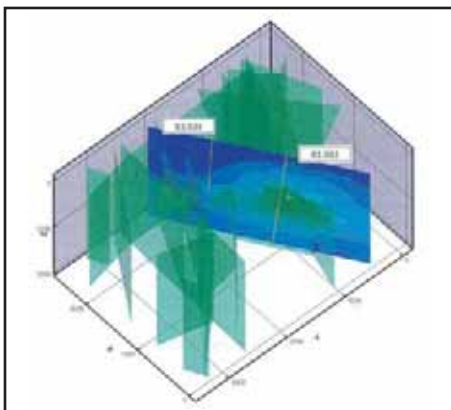
Les outils de modélisation et de visualisation 3D

Les données acquises au cours des étapes de reconnaissance et de caractérisation sont validées et intégrées dans *une base de données*. Il s'agit de mesures directes ou de données calculées. Elles sont généralement localisées en 3D, comme par exemple un prélèvement de roche ou de fluide dans un forage, ou une mesure physique ou géophysique *in situ*.

Une *visualisation 3D* des données est essentielle pour la construction des modèles géologiques qui constituent l'ossature des modèles intégrés couvrant les différentes disciplines, en premier lieu pour la géométrie des structures. Les outils de visualisation doivent permettre de représenter les différents éléments du modèle géologique, c'est-à-dire les lithologies et les fractures. Ils doivent également gérer la localisation et les résultats des échantillons, sondages et mesures ou interprétations géophysiques. Ils doivent aussi intégrer la topographie sous forme de modèles numériques de terrain, images ou photos satellites ou aériennes. Ces outils 3D permettent un accès convivial aux modèles et le partage entre différentes disciplines : géologie, hydrogéologie, géomécanique, géochimie...

Il y a encore peu de temps, cette visualisation était faite à partir de coupes verticales dans deux directions, et de plans à différents niveaux de profondeur. Aujourd'hui, l'informatique permet la construction de véritables modèles tridimensionnels en fournissant les outils d'interpolation et de visualisation. La principale difficulté a consisté à assurer les liens entre *base de données et visualisation 3D* pour les différents types de formations géologiques rencontrées, notamment pour le milieu granitique en prenant en compte la fracturation à différentes échelles.

SKB a développé un système RVS (*Rock Visualisation System*) pour visualiser des failles et des plans de coupes particuliers. Posiva dispose d'un système équivalent qui a été complété par un outil minier de visualisation des structures observées dans l'ouvrage souterrain Onkalo à Olkiluoto. En France, l'Andra a mobilisé des outils de visualisation issus du secteur pétrolier pour la représentation du massif granitique de Charroux-Civray (Vienne).



**À gauche : visualisation de failles et de plans de coupes dans le système « RVS » développé par SKB (Suède)
À droite : visualisation de limites des granites composant le massif de Charroux-Civray (France)**

3 Les modélisations hydrogéologiques, hydrogéo-chimiques et les simulations de transfert

Les modélisations hydrogéologiques sont le support aux simulations de transfert de radionucléides pour les évaluations de la sûreté à long terme. Elles contribuent à évaluer les flux d'eau susceptibles de survenir pendant l'excavation et l'exploitation d'un stockage.

Les modèles hydrogéo-chimiques complètent les modélisations hydrogéologiques pour la compréhension des écoulements hydrogéologiques actuels et passés dans le sous-sol granitique. Ils sont ainsi des appuis aux simulations de transfert de radionucléides.

3.1 Les questions liées à la modélisation d'un milieu fracturé

Les modélisations hydrogéologiques et de transfert du granite sont complexes. Cette complexité tient à la représentation d'un milieu fracturé et à la prise en compte de grandes échelles de temps et d'espace dans les études d'un stockage. Faibles en flux et lents dans leur cinétique, les écoulements d'eau à considérer sont essentiellement liés aux fractures dont la distribution dans le granite ne répond pas à une loi simple et unique.

Les méthodes mises en œuvre ont fait l'objet de développements importants au cours des dernières décennies. Les progrès faits dans le secteur pétrolier ont notamment été à l'origine de méthodes et d'outils qui ont pu être adaptés au milieu granitique et aux études de stockage.

Ainsi, il y a une dizaine d'années, beaucoup des simulations de transferts de radionucléides étaient effectuées à partir de simplifications importantes du milieu granitique fracturé consistant à le traiter numériquement comme l'équivalent d'un milieu poreux. Dans ce mode de traitement, les simulations introduisent les plus grandes failles et le rôle des petites failles est traité par l'attribution de paramètres hydrauliques pondérés à la masse du granite.

Les progrès réalisés permettent de traiter plus explicitement les fractures dans des volumes de roche de plus en plus importants et réduisent les simplifications dans la représentation du granite. Ils sont maintenant régulièrement intégrés dans les modélisations et les simulations réalisées au niveau international, la démarche générale de simulation s'appuyant sur la complémentarité des deux représentations du granite : milieu poreux équivalent et milieu représenté avec la fracturation.

Ceci ne lève cependant pas toutes les difficultés propres aux modélisations à réaliser. Les questions à considérer concernent la caractérisation et les données à recueillir, mais aussi le traitement de ces données et les problèmes de simulation numérique. *In fine*, il s'agit de maîtriser les simplifications qu'il faut introduire tout au long du processus de modélisation, c'est-à-dire d'en comprendre tout le sens aussi bien au niveau des phénomènes élémentaires pris en compte qu'au moment de leur intégration dans les modélisations et simulations.

Les modèles hydrogéologiques en milieu poreux continu et en réseaux de fractures

La modélisation hydrogéologique d'un massif granitique fracturé se heurte à deux exigences fortes pour la modélisation :

- d'une part, il faut prendre en considération un réseau de fractures complexe, jusqu'aux plus petites fractures susceptibles d'être interceptées par un composant du stockage, afin d'appréhender correctement les écoulements qui s'y produisent,
- d'autre part, il est indispensable d'étendre la modélisation sur des espaces suffisamment vastes pour s'assurer que l'ensemble des facteurs déterminant les écoulements en profondeur est pris en compte : topographie, réseau hydrographique de surface souvent au-delà des limites du massif granitique, caractéristiques hydrauliques des parties superficielles altérées du massif granitique.

Les moyens informatiques actuels ne permettant pas encore d'utiliser un modèle en réseaux de fractures sur l'ensemble du volume considérable qu'il faudrait discrétiser à l'échelle des petites fractures, la solution passe donc par l'intégration, à différentes échelles, de modèles en « équivalents poreux » et de modèles représentant explicitement les réseaux de fractures.

• Modèles en « milieu poreux équivalent »

Dans un modèle en milieu poreux continu, les écoulements sont supposés emprunter l'ensemble du volume rocheux disponible et répondre macroscopiquement à la loi de Darcy. Les flux d'eau dépendent directement de la perméabilité du milieu. Ce modèle, valable pour les milieux poreux, peut être utilisé pour des roches fracturées au-delà d'un certain volume qui dépend des caractéristiques géométriques et hydrauliques des réseaux de fractures considérés.

C'est, par exemple, à partir de telles hypothèses qu'ont été réalisés, avec le support de l'Union européenne, les exercices génériques « Everest » et « SPA » de simulations de transfert de radionucléides en milieu granitique.

À l'échelle régionale, c'est-à-dire sur des surfaces dépassant la centaine de km² et des épaisseurs de terrain de plusieurs kilomètres (schématiquement 15 km x 15 km x 3 000 m), les modélisations hydrogéologiques sont encore réalisées à partir de simplifications de ce type. Les failles sont prises en compte dans le modèle par l'attribution de propriétés hydrauliques « équivalentes » à des parties ou à la totalité du volume modélisé.

• Modèles prenant explicitement en compte les fractures

Plusieurs types de modélisation permettent de prendre explicitement en compte un réseau de fractures. Les modèles du type « *Discrete fracture network* » (DFN), les plus couramment utilisés, considèrent un milieu dans lequel, en régime permanent, les fractures seules participent à l'écoulement convectif. Le flux est ainsi contraint par la dimension des fractures, épaisseur et largeur notamment. La géométrie de chaque fracture est définie, ce qui permet de déterminer la connectivité hydraulique du réseau. Une transmissivité hydraulique est attribuée à chaque fracture, la charge et les flux pouvant alors être calculés en tout point du réseau.

Le domaine d'application des modèles DFN est plus particulièrement la modélisation hydrogéologique et les simulations de transfert à l'échelle d'un module de stockage (volume d'environ 500 m x 500 m x 300 m). Les modélisations DFN permettent d'intégrer toutes les fractures jusqu'à une extension de 5 m environ.

• L'intégration des modèles de différentes échelles et de différents types

Il faut emboîter de façon cohérente les échelles de modélisation et les différents types de modèles. Les outils informatiques actuels permettent, par itérations successives, d'intégrer des modèles effectués à différentes échelles et de mettre en cohérence les paramètres utilisés aux différentes échelles depuis l'échelle régionale, jusqu'à l'échelle du module de stockage et de l'alvéole.

En l'absence de site d'étude particulier, le travail de l'Andra a donc consisté à traiter chacune des étapes du processus de modélisation et à vérifier que les méthodes, les techniques et les outils numériques développés à l'étranger seraient applicables à l'étude d'un site dans un granite français :

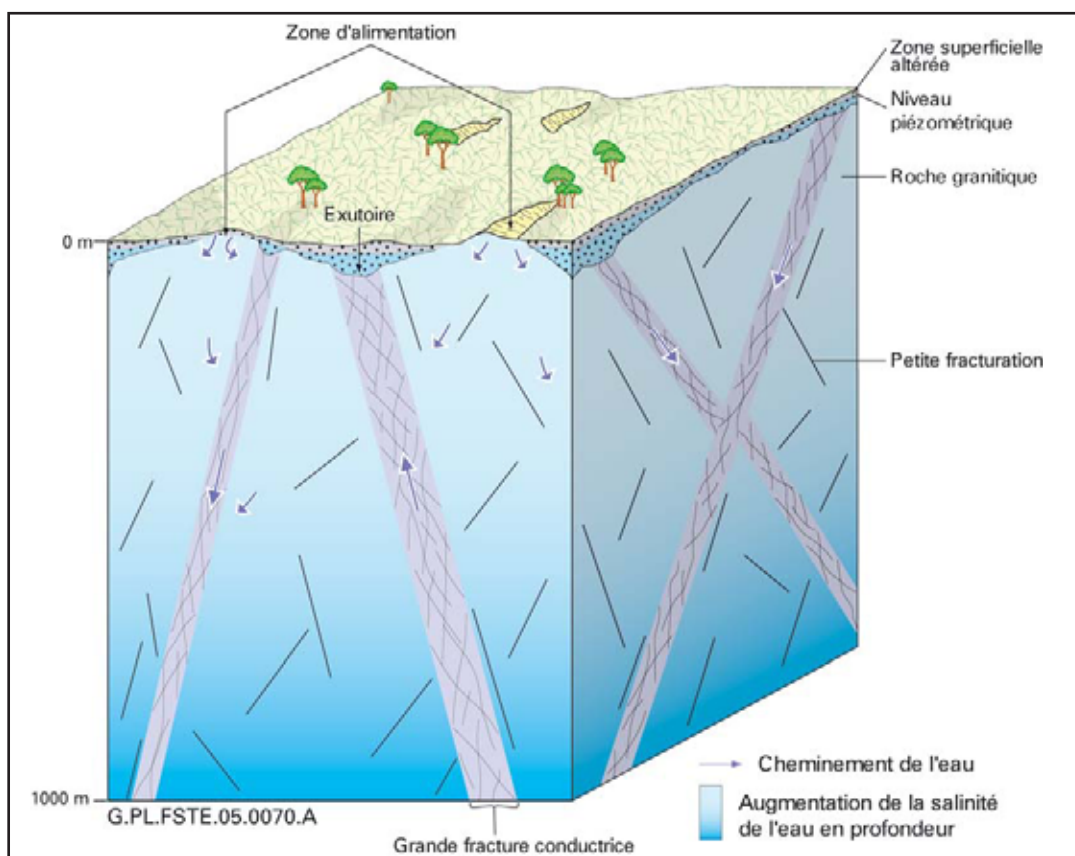
- un premier ensemble de questions a concerné l'identification des phénomènes et des paramètres intervenant dans les modélisations hydrogéologiques, hydrogéochimiques et de transfert dans un granite,
- il a fallu ensuite vérifier que ces paramètres peuvent être déterminés, pour un site donné, à partir de mesures de terrain ou d'analyses de laboratoire,
- les étapes finales de modélisation ou de simulation numérique ont impliqué de tester les méthodes d'intégration cohérentes avec les échelles de temps et d'espace et de justifier des simplifications correspondantes.

Ces études ont permis de conclure que chacune des étapes du processus de modélisation disposait d'un retour d'expérience attestant leur possible application sur un site français. Le réalisme des modélisations et des simulations est suffisamment préservé par les simplifications introduites avec précaution tout au long du processus de calcul.

3.1.1 Les modèles hydrogéologiques et les paramètres

Dans un granite, les fractures sont les lieux de l'écoulement de l'eau. La roche, très peu perméable et très peu poreuse, ne contribue pratiquement pas à l'écoulement de l'eau.

La grande fracturation contrôle la quasi-totalité des écoulements d'eau, généralement faibles. La petite fracturation qui affecte la roche granitique dans les domaines à l'écart de la grande fracturation est généralement peu conductrice d'eau.



Principaux éléments de l'hydrogéologie d'un massif granitique fracturé

Ce modèle conceptuel de l'hydrogéologie dans un granite conduit à fonder la conception architecturale d'un stockage sur l'implantation des modules de stockage à l'abri de la grande fracturation. Dans les modules de stockage, les flux d'eau, faibles, dépendent ainsi des propriétés hydrauliques des petites fractures du granite en paroi des ouvrages.

Les flux d'eau intervenant dans un stockage dépendent de l'orientation et de la valeur des gradients hydrauliques, moteurs des écoulements en profondeur. Ils sont liés d'une part à la topographie du site, d'autre part aux propriétés des parties superficielles du massif granitique qui contrôlent l'infiltration de l'eau de pluie. Généralement les gradients s'affaiblissent avec la profondeur ce qui contribue à limiter les flux d'eau au niveau d'un stockage.

La modélisation hydrogéologique d'un site granitique s'appuie ainsi sur la distribution de la fracturation, les paramètres hydrauliques de la roche et des fractures (leur transmissivité et la connectivité des fractures entre elles) ainsi que sur les valeurs de gradients hydrauliques.

Les caractéristiques chimiques des eaux, notamment leur salinité, peuvent intervenir dans les modèles hydrogéologiques et de transport. Dans le cas d'une forte salinité des eaux en profondeur, leur densité peut induire une stratification des eaux avec la profondeur. Ceci peut en particulier concerner des situations littorales ou des saumures d'origine ancienne. De telles situations sont prises en compte dans les études de sites en cours en Suède et en Finlande. Ceci permet de disposer d'un retour d'expérience dans ce domaine.

3.1.2. Les modèles de transfert et de rétention dans un granite

Un grand nombre de radionucléides sont très peu mobiles dans un granite du fait de leur faible solubilité dans les conditions d'environnement chimique régnant en profondeur : milieu réducteur, pH s'écartant peu de la neutralité. C'est notamment le cas des actinides. Cependant, d'autres radionucléides plus solubles sont mobiles (iode 129, chlore 36, et césium 135 par exemple). Il convient donc de disposer de modèles conceptuels de transport et de rétention de radionucléides dans la roche et les fractures du granite ainsi que des éléments de quantification des paramètres à introduire dans les simulations. Cette question importante a fait l'objet d'une coopération internationale très active, notamment d'expérimentations menées au laboratoire d'Äspö en Suède.

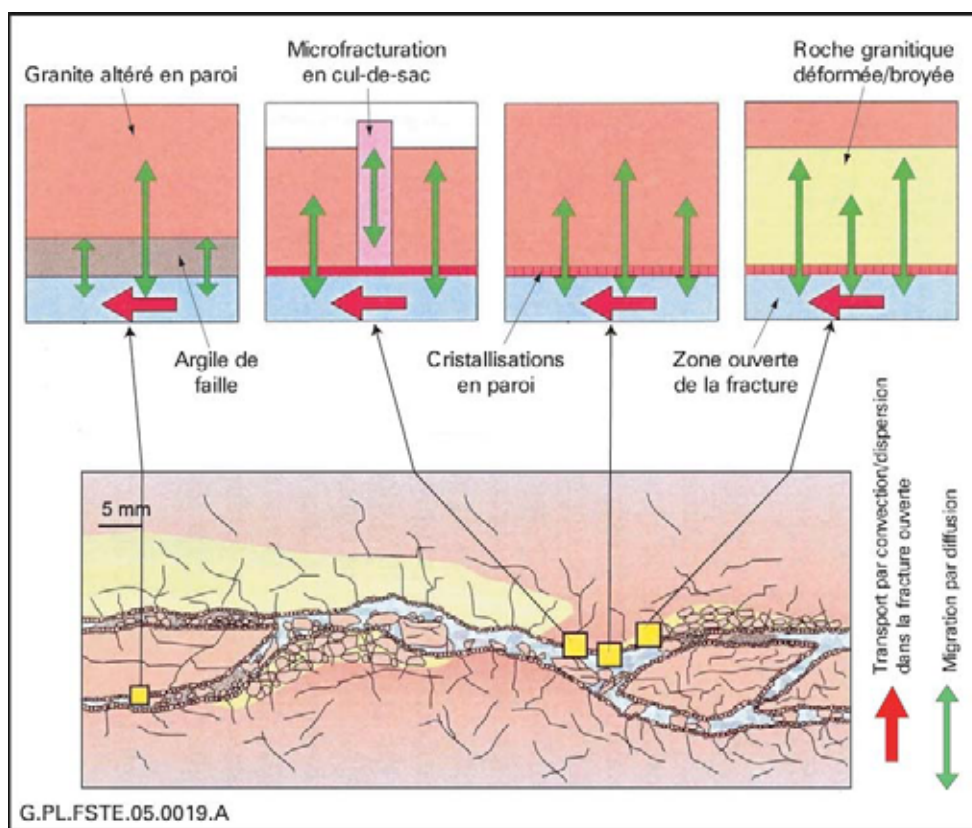
Différents phénomènes interviennent dans le transport et la rétention des radionucléides en milieu granitique fracturé dont les principaux sont la convection, la dispersion et la diffusion.

Lorsque l'eau circule dans les parties ouvertes des fractures, les radionucléides en solution se déplacent également entraînés par l'eau. C'est le transport par convection. La complexité géométrique des multiples cheminements empruntés par les flux d'eau produit une dispersion des solutés au cours du transport.

Cependant, la cinétique de l'écoulement de l'eau est lente. Le phénomène de diffusion se surimpose ainsi au transport par convection/dispersion. Il concerne toutes les parties en mouvement, mais également les nombreux volumes à déplacement très lent ou immobiles que contient la structure intime des fractures (petits diverticules en cul-de-sac, roche plus ou moins altérée en paroi, remplissages poreux éventuels...). La diffusion favorise l'adsorption (piégeage) des radionucléides susceptibles de se fixer en paroi des fractures ou sur les minéraux et éléments « bréchifiés » de roche qui remplissent les fractures et multiplient les surfaces accessibles. En permettant à certains radionucléides de sortir pour un temps du flux d'eau circulant, les phénomènes de diffusion et de rétention retardent la migration des solutés par rapport à un transport convectif.

Ce modèle conceptuel de transport (figure ci-après) a été précisé au travers des expérimentations faites dans le laboratoire d'Äspö en Suède. Les expériences et les exercices de modélisation associés ont permis de confirmer le rôle des phénomènes de diffusion dans le transfert de radionucléides dans une fracture et d'identifier les composants des fractures intervenant dans le transport, en particulier le rôle des zones stagnantes où la diffusion entre les fractures et la roche en paroi est importante.

Ainsi, les paramètres de transport à caractériser sont essentiellement les coefficients de diffusion dans la roche et les paramètres de rétention de la roche et des minéraux des fractures.



Modèle conceptuel de fracture et phénomènes de transport

3.2 Le recueil de données

Les forages constituent le moyen le plus utilisé lors des travaux de reconnaissance et de caractérisation hydrogéologique ou hydrogéochemique d'un massif granitique en profondeur. À chaque étape de la reconnaissance, à partir de la surface ou en souterrain, les techniques de forages, carottés ou destructifs, sont adaptées aux objectifs de caractérisation hydrogéologique ou hydrogéochemique. Un large retour d'expérience existe dans ce domaine mettant à disposition une panoplie très complète de techniques et d'outils éprouvés et adaptés à de nombreux contextes.

3.2.1 Les données hydrogéologiques

La conductivité hydraulique du granite, plus précisément celles des fractures qui la produisent, est essentiellement déterminée par des tests hydrauliques en forage.

Différentes techniques sont mobilisées selon la plus ou moins grande transmissivité hydraulique des fractures :

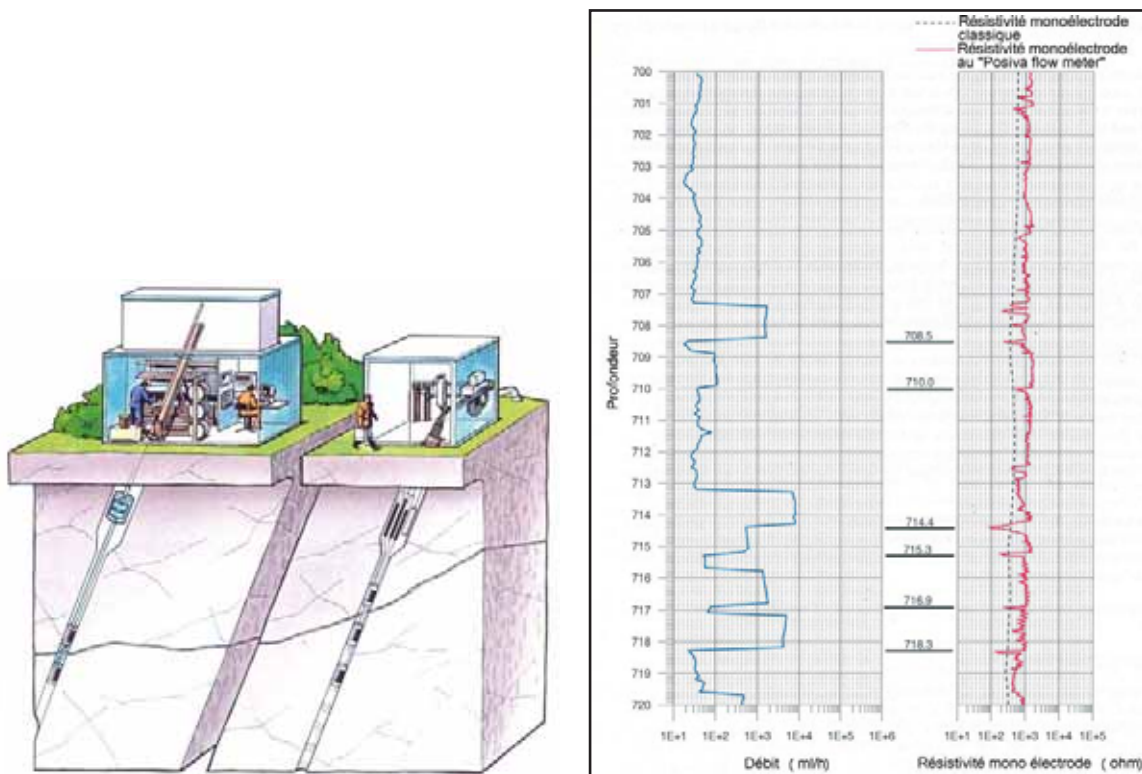
- pour les grandes fractures où la transmissivité est significative, les techniques classiques de l'hydrogéologie (pompages, micro moulinet...) suffisent pour déterminer les caractéristiques hydrauliques du granite,
- si la transmissivité est plus faible la technique du « *fluid logging* », basée sur la détection de différences de conductivité électrique, donc de salinité, est bien adaptée pour localiser les fractures produisant un flux faible,
- si la transmissivité est très faible (cas des petites fractures), la technique du *fluid logging* est associée à une diagraphie de flux différentiel dans le forage similaire à celle mise au point en Finlande et utilisée de façon systématique en forages de reconnaissance,
- enfin, des tests entre obturateurs fixes permettent de caractériser précisément la roche granitique, par nature très peu perméable, et les petites fractures là où elles sont très peu transmissives.

La connectivité entre les fractures est un autre paramètre important. Elle peut être évaluée par des tests d'interférence hydraulique entre forages. Ce type de tests concerne plus particulièrement les grandes fractures (figure ci-après).

D'autres mesures peuvent être faites à partir d'équipements mesurant la pression de l'eau dans un même forage, celui-ci étant fractionné en chambres de mesures par des obturateurs. Le fractionnement permet de mesurer la pression de l'eau d'une fracture ou d'une zone de fracture spécifique et d'évaluer la connectivité entre fractures ou groupes de fractures.

Les développements de ces techniques, notamment dans le cadre des études pétrolières, permettent de disposer d'un ensemble d'outils complémentaires pour caractériser la connectivité d'un réseau de fractures à différentes échelles : dizaines à plusieurs centaines de mètres.

Un troisième ensemble d'informations concerne les gradients hydrauliques, moteurs des écoulements dans un massif. Ils sont établis à partir des données topographiques et de mesures piézométriques en forages.



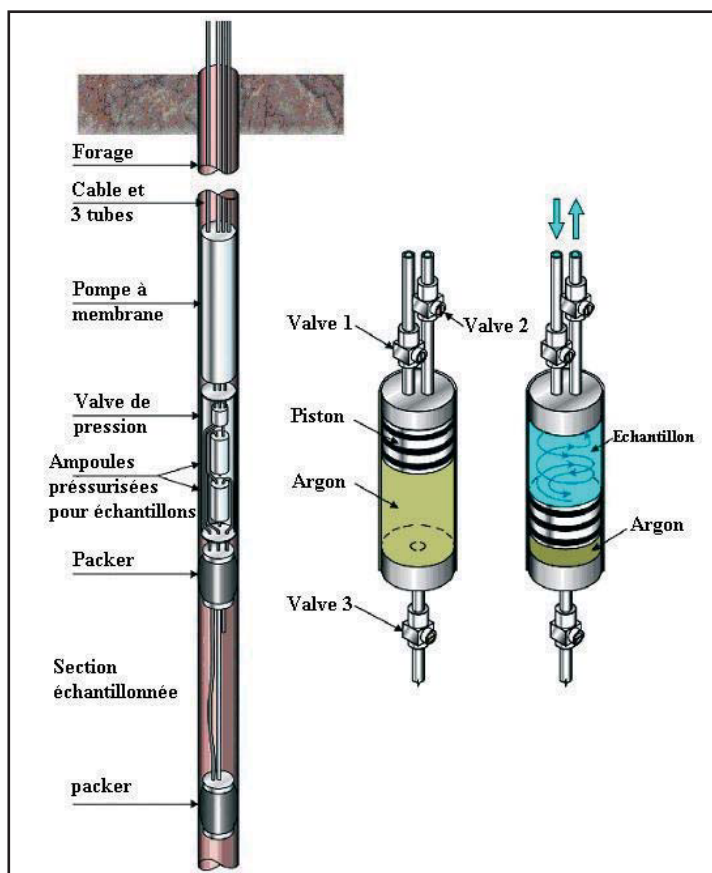
À gauche, schéma de principe d'un test d'interférence hydraulique destiné à étudier la connectivité d'une fracture entre deux forages (données SKB).

À droite, des mesures continues en forages montrant la relation entre débit et conductivité électrique pour déterminer la position précise des fractures conductrices (données Posiva)

3.2.2 Les données hydrogéochimiques

La composition de l'eau d'un massif granitique est déterminée à partir des prélèvements d'eau dans les forages.

Différentes techniques, progressivement mises au point, répondent aux exigences des analyses chimiques ou isotopiques à réaliser. Selon les productions d'eau détectées par les mesures hydrogéologiques, les prélèvements de fluide peuvent être faits directement à l'exhaure des forages, ou au fond grâce à des bouteilles étanches ou à des prélèvements en continu.



Système de prélèvement de fluide en forage PAVE développé en Finlande (données Posiva)

3.2.3 Les paramètres de transfert et de rétention

Les propriétés de diffusion de la roche granitique sont établies pendant la reconnaissance d'un massif granitique par un échantillonnage à partir de carottes de forage et de prélèvements en galeries souterraines, voire dans les affleurements en surface quand les conditions d'altération s'y prêtent.

Les propriétés de rétention sont liées à la caractérisation minéralogique de la roche et des fractures ainsi qu'à la géométrie intime des vides et des volumes poreux. Les valeurs des paramètres associés sont établies à partir de mesures sur des échantillons de granite. Des tests de traçage entre forages *in situ* permettent de vérifier la cohérence des mesures faites sur échantillons avec des valeurs extrapolées, au vu de la variabilité géologique, à l'échelle d'une grande fracture.

• Les analyses et les mesures sur échantillons de granite

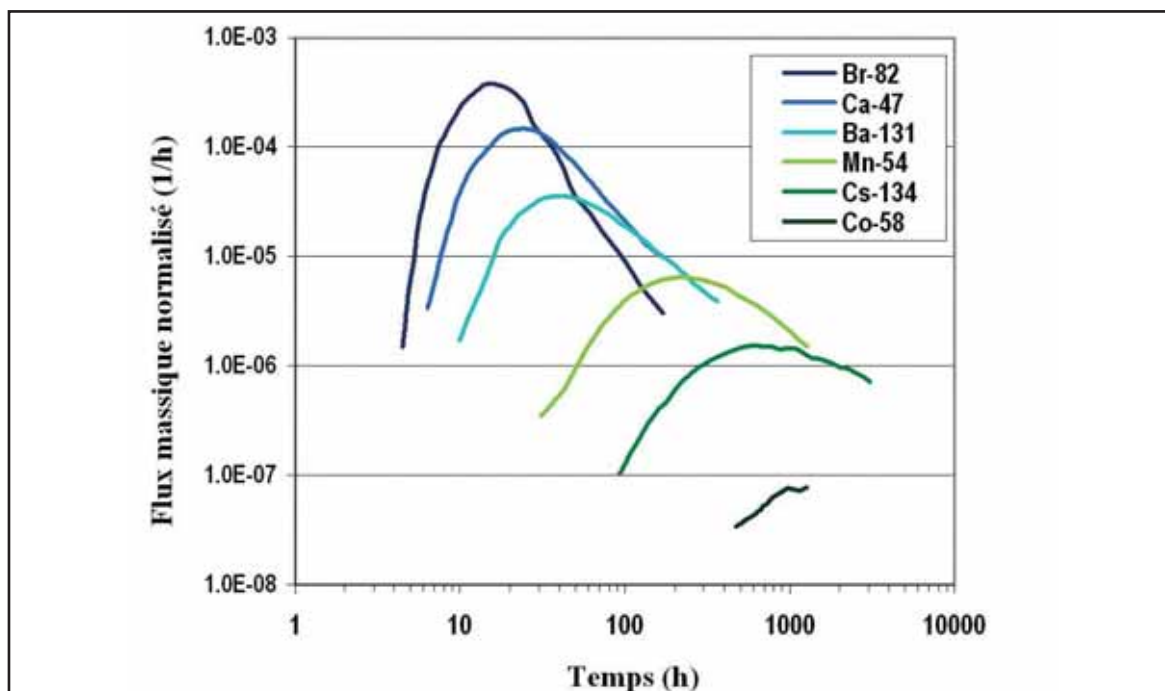
Des mesures des coefficients de diffusion d'un granite ont été effectuées sur de nombreux types de granite en France et à l'étranger. Elles sont généralement réalisées en testant la cinétique de diffusion de l'eau tritiée au travers d'une tranche centimétrique de granite. Cette méthode a été utilisée lors des travaux réalisés entre 1994 et 1996 par l'Andra sur le massif granitique de Charroux-Civray.

Ce massif composé de plusieurs granites a permis un échantillonnage extensif de différents types de roche. Les coefficients de diffusion mesurés sont généralement très faibles avec des valeurs le plus souvent inférieures à $10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$. Quand le massif granitique a été soumis à des altérations hydrothermales importantes durant son histoire géologique, les valeurs peuvent croître d'un facteur 10 ou 100.

• Les tests de traçage entre forages

Dans un granite, des tests de traçage consistent à injecter un mélange de traceurs en un point précis d'une fracture et à en observer la restitution, à une certaine distance, dans la même fracture ou dans une autre fracture connectée. À condition d'avoir réalisé préalablement une caractérisation géologique et hydraulique suffisamment précise du réseau de fractures, ce type de tests permet d'évaluer le retard au transfert de radio-nucléides par rapport à la circulation de l'eau.

De tels traçages ont fait l'objet d'un programme expérimental important dans le laboratoire d'Äspö en Suède (expérience « TRUE »). Ils ont permis de préciser le modèle conceptuel de transport en milieu fracturé et de quantifier les retards différentiels entre radionucléides. Ainsi, un facteur de retard de 250 a été constaté sur le cheminement dans une seule fracture pour le césium par rapport à un élément non retardé (par exemple le brome).



Courbe de restitution comparée de différents traceurs sur un même cheminement

3.3 Des méthodes d'intégration assurant le lien entre reconnaissance d'un site et analyses de sûreté

Des méthodes existent aujourd'hui pour intégrer les données de la reconnaissance d'un site aux analyses de sûreté et études de conception. Elles se fondent sur un processus complet de modélisations depuis l'acquisition des données géologiques jusqu'à la simulation du transfert de radionucléides ainsi que sur l'ensemble des connaissances scientifiques contribuant à comprendre l'hydrogéologie d'un massif granitique. Parmi ces données, l'hydrogéochimie constitue un complément naturel aux modélisations hydrogéologiques pour comprendre les écoulements des eaux dans un granite et son environnement.

3.3.1 Un processus de modélisation prenant explicitement en compte les données relatives à la fracturation du granite

Les questions relatives à l'intégration des données de site aux évaluations de sûreté, au travers des modélisations hydrogéologiques et des simulations de transfert de radionucléides, concernent les principaux aspects suivants :

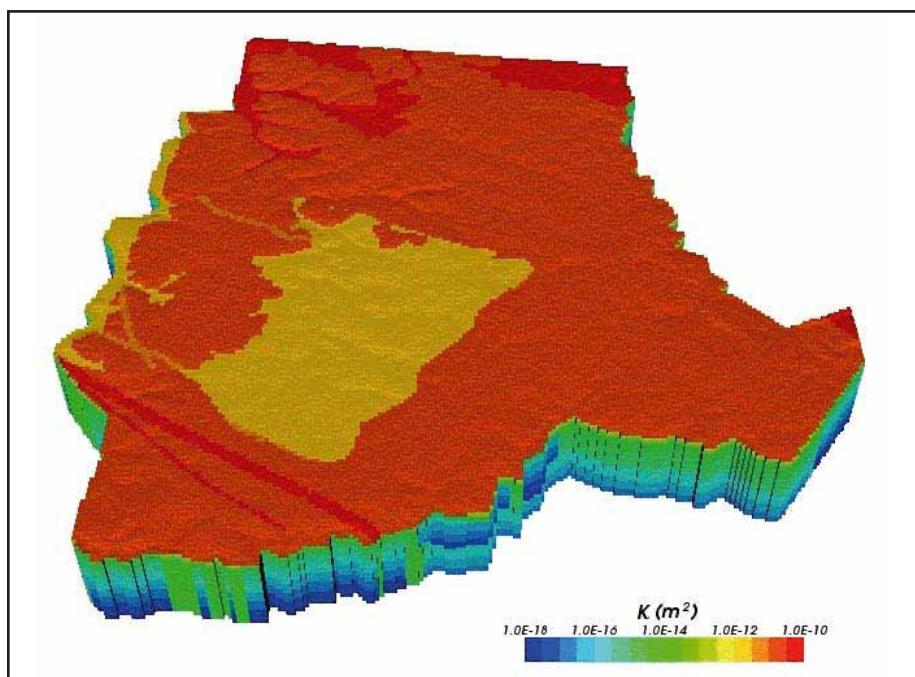
- l'intégration des différentes échelles d'espace dans les modélisations géologiques et hydrogéologiques,
- la prise en compte de la variabilité des propriétés de transport des fractures à l'intérieur d'un massif granitique,
- la prise en compte des différents phénomènes intervenant dans le transfert et la rétention des radionucléides dans un réseau de fractures d'un massif granitique,
- l'intégration sur de grandes échelles de temps des différents phénomènes.

Ces questions ont fait l'objet de nombreuses études et applications, notamment dans le cadre du projet « Task Force d'Äspö », mené en coopération internationale et qui s'est appuyé sur les données du laboratoire suédois. L'ensemble des méthodes étudiées répond aux questions soulevées en assurant l'intégration des données de site aux différentes échelles de temps et d'espace à considérer dans les modélisations. Les méthodes se fondent sur la prise en compte explicite des données relatives à la fracturation d'un granite qui sont recueillies sur un site. Le développement des méthodes de modélisation d'un milieu granitique en « réseaux de fractures » permet en effet d'introduire les données de site dans le processus de modélisation sans simplification drastique dès les premiers temps de la simulation. Les simplifications font l'objet d'un processus progressif et itératif permettant de confronter, tout au long des étapes de reconnaissance d'un site, les données de site et les résultats des modélisations.

Processus de modélisation et données de site

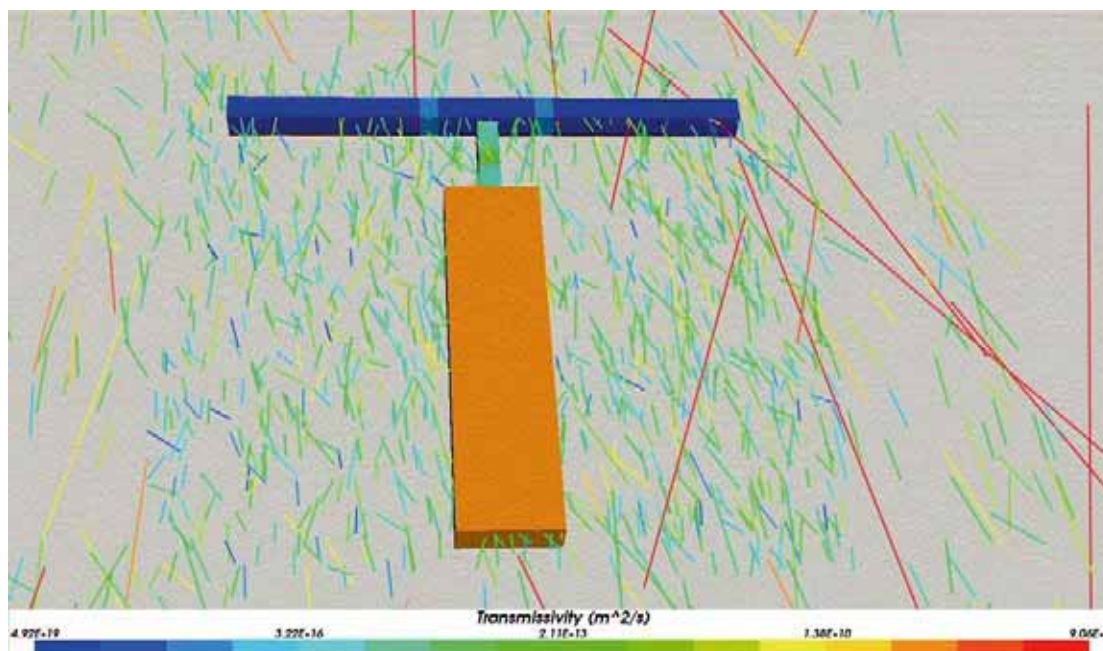
Dans un contexte d'études génériques, l'Andra a effectué des exercices de modélisation en s'appuyant sur les acquis au niveau international ainsi que sur les données de site recueillies sur le terrain en France, notamment sur le site de la Vienne (1994-1996) étudié par l'Andra ou le site d'Auriat (Creuse) étudié par le CEA (1980-1981). Ceci a permis d'établir un schéma type du processus de modélisation qu'il s'agirait de conduire tout au long des différentes étapes de reconnaissance d'un site.

À l'échelle de la région et du massif granitique, les modèles géologiques représentent la structure d'un massif granitique dans son contexte géologique. Les modèles identifient les différentes unités lithologiques composant un massif granitique et ses encaissants. La grande fracturation, failles régionales ou « locales », est modélisée de façon déterministe, c'est-à-dire en établissant une géométrie 3D à partir des levés géologiques de surface, des levés géophysiques et des forages réalisés pendant les travaux de reconnaissance. Des modèles hydrogéologiques en « milieu poreux continu » sont établis en intégrant les mesures hydrogéologiques en forage (piézométrie, perméabilités...).



Exemple d'un modèle 3D montrant la distribution de la perméabilité et son évolution avec la profondeur

À l'échelle du module de stockage, les modélisations géologiques prennent en compte la petite fracturation, caractérisée soit à partir de la surface soit par des ouvrages souterrains, et dont la géométrie et la distribution dans un massif granitique sont traitées de façon probabiliste à partir des données de site. Le traitement regroupe les fractures par « familles de fractures » aux propriétés géologiques, hydrogéologiques et de transport spécifiques. Des lois de distribution, validées par méthodes d'inversion et par confrontation avec les données de site, traitent de façon probabiliste la variabilité des propriétés des fractures dans le granite à l'échelle d'un ou plusieurs modules de stockage. ...



Réseau de fractures à l'échelle d'un module ; les intersections des fractures avec un plan horizontal sont classées par transmissivité

Les différentes méthodes d'intégration assurent la continuité et le lien des modèles à l'échelle régionale et à l'échelle du module de stockage. Du point de vue hydrogéologique, les bilans de flux d'eau et la continuité de la distribution des gradients hydrauliques entre les différentes échelles de modélisation sont les principaux éléments assurant la cohérence des différentes échelles de modélisation entre elles.

3.3.2 L'apport de l'hydrogéochimie

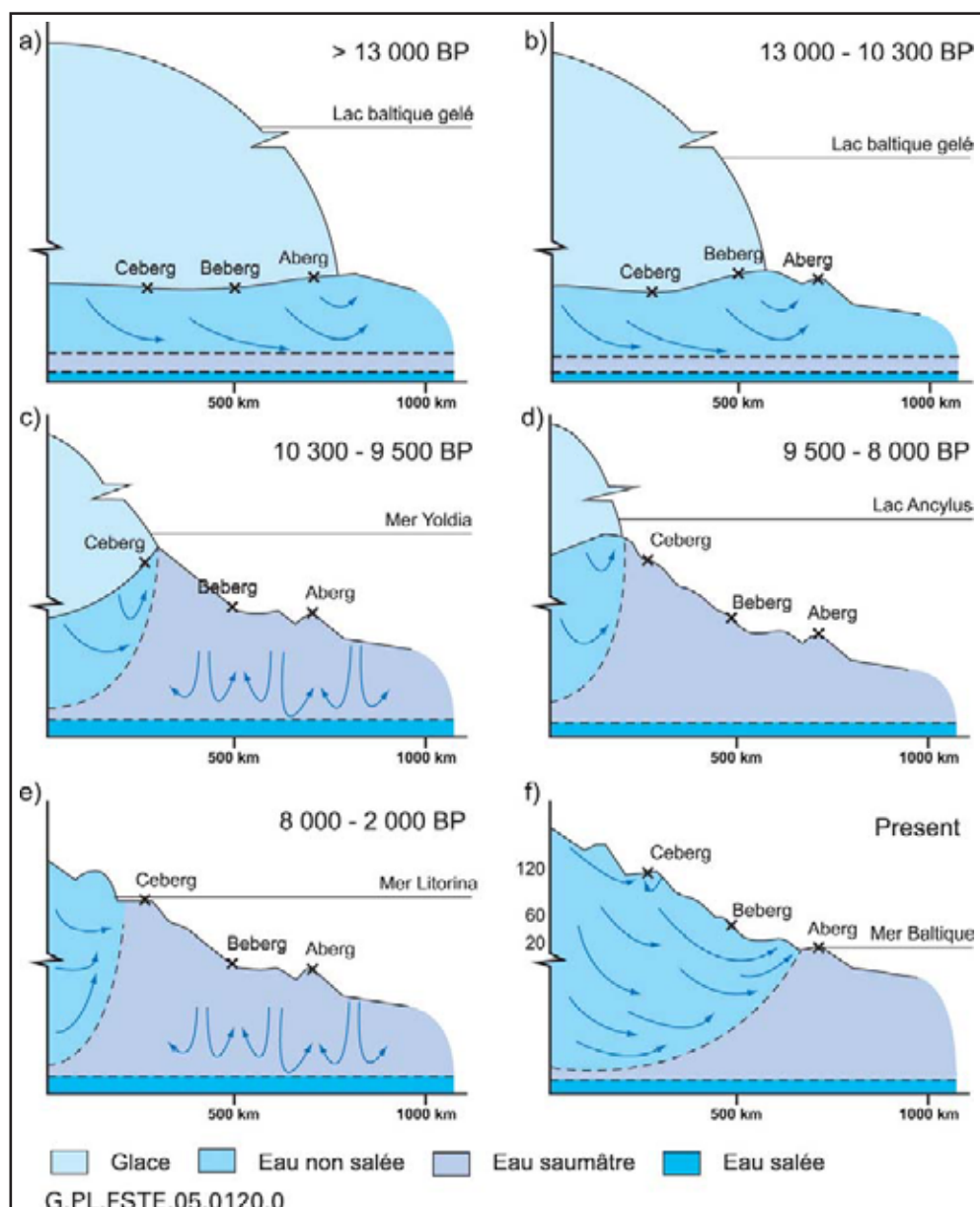
La composition des eaux d'un granite reflète les échanges chimiques des eaux avec la roche granitique et les fractures, donc les circulations d'eaux dans le granite. Comprendre et modéliser ces échanges est un moyen de reconstituer leur cheminement.

Souvent constatée en milieu granitique, l'augmentation de la salinité des eaux avec la profondeur reflète les échanges entre les eaux profondes, plus anciennes, d'un massif granitique et les eaux superficielles plus récentes. Des évolutions isotopiques de la composition des eaux relèvent de la même tendance. Ceci a pu être constaté sur le site de la Vienne étudié par l'Andra en France.

Développées avec succès en Fenno-Scandinavie et au Canada, des méthodes de modélisation des échanges entre eaux d'origines différentes ont permis de reconstituer l'évolution de la composition chimique des eaux du granite et leur distribution actuelle dans un massif. Applicables dans le contexte français, elles fournissent des éléments pour valider les modélisations hydrogéologiques et de transport à effectuer à l'échelle d'un site et sur de longues durées.

La modélisation hydrogéochimique d'un site granitique : l'exemple d'Äspö en Suède

L'histoire géologique et hydrogéologique de la région d'Äspö est dominée par les épisodes glaciaires quaternaires qui ont contrôlé la paléogéographie du site avec la présence, puis la fonte, d'une calotte glaciaire. Il y a eu succession de situations littorales marines et lacustres. Les eaux circulant dans le granite en profondeur sont ainsi le résultat d'un mélange d'eaux marines, d'eaux saumâtres, d'eau de fonte de glace, d'eaux météoriques récentes (figure ci-dessous).



Scénario conceptuel post glaciation de l'évolution du site d'Äspö (données SKB)

Les méthodes de modélisation hydrogéochimiques développées à partir de ce schéma paléogéographique ont permis de reconstituer l'évolution de la composition des eaux de différentes origines et leur distribution actuelle dans le massif granitique. La précision du modèle a pour limite l'existence à une proportion minimale de 10 % d'une eau d'une origine donnée. Le modèle hydrogéochimique est ainsi complémentaire aux modélisations hydrogéologiques ; il est notamment un élément de validation des propriétés hydrauliques du granite à l'échelle d'un site et des modélisations hydrogéologiques aux grandes échelles de temps.

4 La modélisation géomécanique

Le vaste retour d'expérience en matière d'excavations souterraines dans le granite démontre la faisabilité en profondeur d'ouvrages stables et de grande dimension.

Cependant, la réalisation d'ouvrages stables ne signifie pas automatiquement l'absence de tout endommagement du granite en paroi du fait de leur excavation. Elle n'explique pas non plus quel peut être le comportement mécanique du granite dans l'environnement d'un stockage en réponse, notamment, à des sollicitations thermiques.

Comprendre et modéliser un granite consiste donc également à disposer d'une juste description du comportement mécanique du granite et de son éventuel endommagement au cours des différentes phases du stockage. Il faut aussi évaluer les conséquences de ce comportement sur les propriétés hydrauliques du massif et le transfert de radionucléides.

Il faut donc disposer :

- des méthodes pour caractériser, du point de vue mécanique, le massif granitique étudié,
- des moyens de simulation numérique du comportement du granite, milieu fracturé, dans un stockage.

4.1 Les caractéristiques mécaniques du granite et leur recueil sur site

La caractérisation mécanique d'un massif granitique comporte classiquement deux volets :

- la caractérisation des propriétés mécaniques de la roche prenant en compte la fracturation qui peut l'affecter,
- la mesure des contraintes mécaniques naturelles régnant en profondeur.

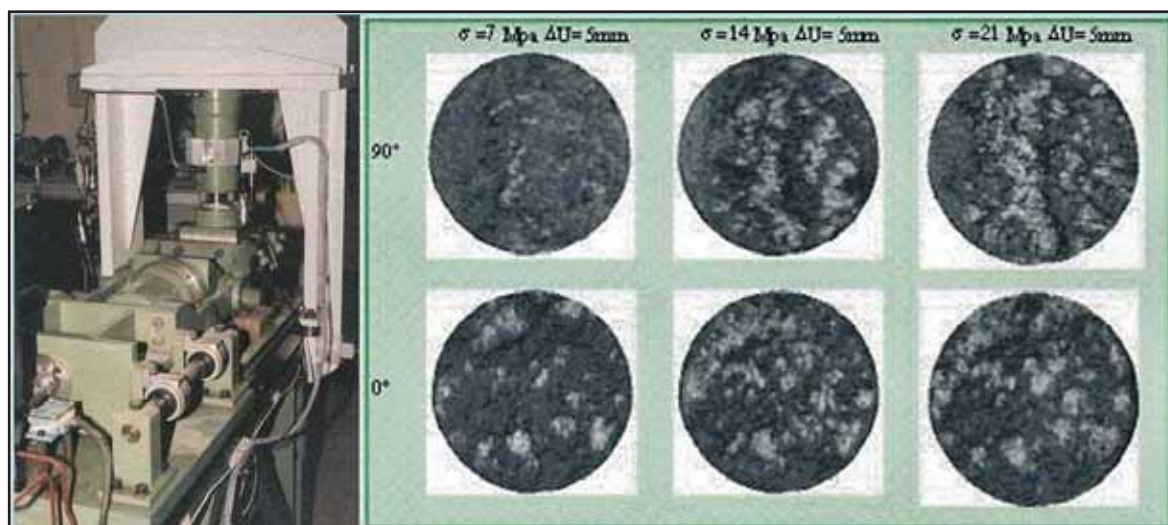
4.1.1 La caractérisation mécanique de la roche granitique

Le granite est une roche mécanique résistante¹ dont le comportement mécanique résulte essentiellement de la fracturation du massif.

Les ouvrages de stockage sont implantés dans une roche peu fracturée ; cependant, la caractérisation de la fracturation permet de s'assurer qu'elle n'est pas de nature à fragiliser la roche autour des ouvrages. Rentrent en jeu la « rugosité » des surfaces de la fracture et la nature des minéraux qui la constituent. La résistance des fractures est évaluée par des essais de cisaillement selon des méthodes expérimentales éprouvées.

Les nombreux essais réalisés sur échantillons au niveau international ont servi de base à l'élaboration de lois relatives au comportement mécanique des fractures en fonction de leurs caractéristiques géométriques et minéralogiques. Des expériences in situ et en vraie grandeur permettent d'ajuster les différents coefficients intervenant dans les modèles à l'échelle des ouvrages considérés. Ceci a notamment été réalisé dans les laboratoires souterrains de Suède et du Canada.

¹ La résistance à la compression de la roche granitique est supérieure à 100 MPa, sa résistance à la traction supérieure à 6 MPa.

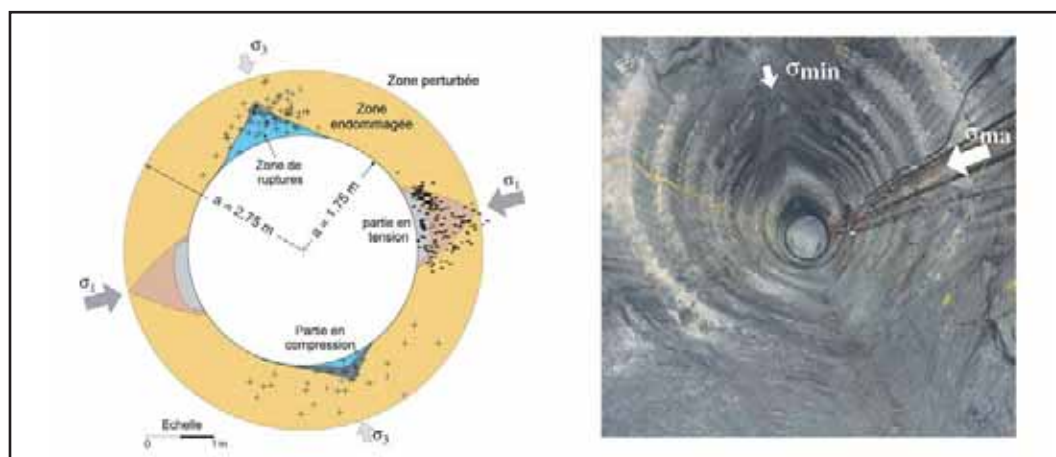


Machine pour essais de cisaillement sur des échantillons de fractures dans un granite et photos des surfaces de fractures après cisaillement (5 mn) (Riss et al, 1997)

4.1.2 Les contraintes naturelles dans le sous-sol granitique

L'état de contraintes mécaniques régnant dans un massif granitique en profondeur résulte du poids des terrains sus-jacents et des contraintes d'origine géodynamique.

Le dimensionnement d'un ouvrage dépend de l'anisotropie des contraintes horizontale ou verticale dans le sous-sol. De fortes anisotropies de contraintes ont, par exemple, été observées en profondeur dans le laboratoire canadien du lac du Bonnet. Elles correspondent à une situation très particulière : à cet endroit, le massif granitique en dessous de 300 m n'est pas fracturé et les contraintes tectoniques qu'il a subies au cours de son histoire n'ont pu se relaxer. Le comportement de galeries sous un tel régime a été testé et leur géométrie ajustée. Les modèles mécaniques représentant le comportement de la rupture du granite dans de telles conditions ont été mis au point.



Laboratoire souterrain du lac du Bonnet au Canada : endommagement du granite en paroi d'une galerie circulaire soumise à un régime de contraintes fortement anisotrope

Dans le contexte tectonique français, le rapport entre la contrainte horizontale majeure et la contrainte verticale est estimé entre 1 et 2. Il témoigne d'une faible anisotropie des contraintes dans le sous-sol et de situations moins particulières pour la réalisation d'ouvrages en profondeur. Cette appréciation ne peut toutefois être établie de façon générale et doit être validée par des mesures de contraintes *in situ* sur un site de reconnaissance.

Les techniques de mesures de contraintes ont beaucoup progressé au cours des dernières décennies. Parmi ces techniques, des tests de fracturation hydraulique en forage adaptés au granite permettent d'obtenir des valeurs comparables d'un point à un autre du massif. Ces tests consistent à provoquer l'ouverture de fractures dans la roche par injection d'eau sous pression. Les fractures ouvertes sont identifiées et caracté-

risées, ce qui permet de connaître l'orientation et la valeur des contraintes. Ce type de tests a été réalisé en France et à l'étranger ; il a permis de mettre au point les techniques de mesures et d'identifier les incertitudes liées à la prise en compte, dans le traitement et l'interprétation des données, des fractures initialement existantes dans la roche.

4.2 La simulation du comportement mécanique du granite

La simulation du comportement mécanique d'un massif granitique fracturé, sous sollicitations mécaniques ou thermiques, fait appel à des modèles spécifiques portant à la fois sur le comportement de la matrice rocheuse, milieu continu, et sur celui des fractures en tant qu'éléments discrets. La recherche de solutions efficaces et couvrant tous les aspects du comportement du massif rocheux fait encore l'objet de travaux de développement et de validation.

Les questions à résoudre relèvent, d'une part des différentes échelles et familles de fracturation à prendre en compte, d'autre part des relations complexes entre déformations mécaniques des fractures et modifications de leurs propriétés hydrauliques.

Aussi, les simulations visent le plus souvent à vérifier que les domaines de déformations étudiés sont de faible amplitude, sans conséquence au premier ordre sur les propriétés mécaniques, hydrauliques et thermiques du massif.

Pour la conception, les dimensionnements sont effectués avec des marges de précaution et assurent de rester dans le périmètre du domaine de faibles déformations. Les dispositions proposées pour un stockage en termes de remblai, de scellement ou de barrière ouvragée en argile gonflante sont également des moyens de limiter les déformations dans des ouvrages soumis à des sollicitations mécaniques et thermiques.

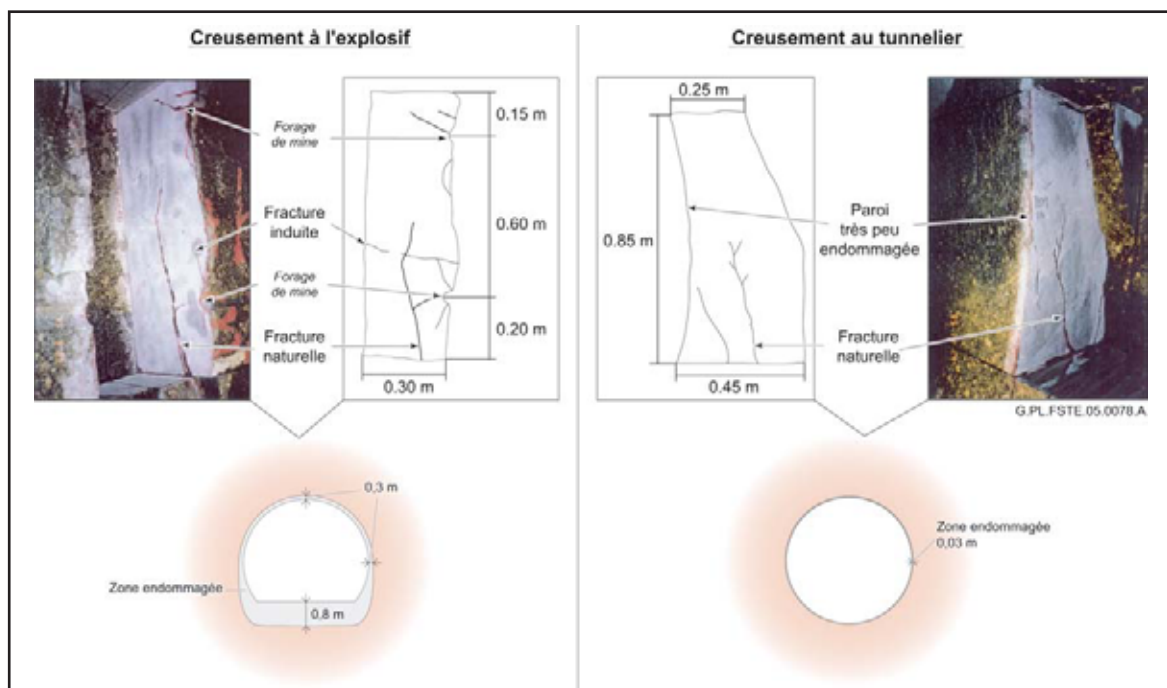
4.2.1 La modélisation de l'endommagement mécanique du granite en paroi des ouvrages

Des concentrations de contraintes peuvent localement apparaître en paroi des ouvrages lors de leur excavation et provoquer un endommagement de la roche et des écaillages spontanés. Les expérimentations en laboratoires souterrains ont précisé les conditions dans lesquelles de tels endommagements peuvent se produire, et testé les différents modèles numériques mis au point.

Les modèles élaborés permettent aujourd'hui de disposer de critères vis-à-vis de la possibilité d'apparition de tels phénomènes ; par exemple, les rapports entre les contraintes tangentielles qui affectent la roche en paroi d'ouvrages et la résistance de la roche mesurée par un essai de compression uniaxiale. Les différents modèles, mis en œuvre à partir d'un modèle discret de fractures ou représentant le granite sous forme de grains (« particules »), sont cohérents et ont permis d'identifier les incertitudes à prendre en compte dans le dimensionnement des ouvrages et les analyses de sûreté.

Des expérimentations dans les laboratoires du Canada (« *Room 209* » et « *Mine by experiment* ») et de Suède (« *ZEDEX* ») ainsi qu'en Finlande (« *Olkiluoto Research Tunnel* ») et au Japon (« *Kamaishi mine* ») ont examiné la création d'une zone endommagée dans la roche selon différentes méthodes de creusement (tirs à l'explosif, mini-tunnelier « *Tunnel Boring Machine* »). Elles montrent que l'endommagement demeure dans tous les cas très limité (extension inférieure au mètre) et qu'il est possible de le minimiser très fortement en recourant à des méthodes par foration (extensions de quelques centimètres).

De façon similaire, l'abattage mécanique du granite par foration de petits puits verticaux réduit très fortement l'endommagement en paroi des ouvrages. L'analyse très détaillée de l'endommagement du granite en paroi de puits excavés par foration effectuée dans le tunnel de recherche d'Olkiluoto (Finlande) a montré que l'endommagement y est très faible et se réduit à une déstructuration des grains du granite sur un centimètre ou moins en profondeur.



Zone endommagée en paroi de galerie (expérience « ZEDEX » au laboratoire d'Åspö)

4.2.2 Les modèles couplés hydro-mécaniques et thermo-hydromécaniques

Les propriétés hydrauliques des fractures, notamment de la petite fracturation, dépendent de l'état de contraintes du massif. La transmissivité hydraulique des fractures est sensible à la contrainte normale qui s'exerce sur les plans de fractures. La modification locale du régime de contraintes qui s'y applique est ainsi susceptible d'en modifier les propriétés hydrauliques. Elle peut être due à l'excavation d'ouvrages ou à l'échauffement du massif lié au stockage de déchets exothermiques.

La simulation des modifications des propriétés hydrauliques d'un réseau de fractures est complexe tant du point de vue théorique qu'en terme de validation expérimentale. Cependant, les différentes expérimentations menées en France et à l'étranger ont permis d'identifier les paramètres importants à intégrer dans les simulations : géométrie et propriétés mécaniques des fractures liées à la rugosité des plans de fractures, à la nature des minéraux de remplissage à leur ouvertures hydraulique ou mécanique... Différentes lois de comportement ont été proposées et des modèles numériques établis.

Les exercices internationaux réalisés sur ce thème, tels les projets Decovalex ou Benchpar qui s'appuient notamment sur les résultats d'expérimentations dans la mine de Kamaishi au Japon, ont conclu que les modélisations mécaniques peuvent appréhender l'ordre de grandeur des modifications de l'état de contraintes et des déplacements le long des fractures d'un granite fracturé. Ceci définit ainsi le domaine et le régime de déformation à intégrer dans les analyses de sûreté ainsi que dans la conception et le dimensionnement des architectures de stockage.

En particulier, la mise en place de remblai et de barrières ouvragées en argile gonflante est un dispositif très généralement adopté pour le stockage des combustibles usés et des déchets C exothermiques. Le gonflement des argiles contribue à la stabilité des parois d'ouvrages, là où les modifications de contraintes liées à la thermique sont les plus fortes.

5 Prendre en compte l'évolution géodynamique et climatique à très long terme : la géoprospective

À l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années, un massif granitique et son environnement sont susceptibles de modifications liées aux phénomènes géodynamiques internes (mouvements tectoniques, tremblements de terre, volcanisme) ou externes (changements climatiques et phénomènes d'érosion en surface). Les études ont ainsi pour objet d'identifier les phénomènes pouvant intervenir aux différentes échelles de temps à prendre en compte dans l'évolution d'un stockage.

Sans site d'étude particulier, les études ont visé deux objectifs :

- identifier les facteurs d'évolution géodynamique à considérer dans la reconnaissance de site pour répondre aux préconisations de la RFS III.2.f. en terme de stabilité à long terme,
- évaluer les conséquences possibles de l'évolution d'un site granitique sur l'environnement d'un stockage, notamment du point de vue de l'hydrogéologie.

L'analyse a été effectuée de façon générique à l'échelle de la France continentale, avec un examen particulier des zones granitiques du Massif Central et du Massif Armoricain. Du point de vue méthodologique, l'évolution de ces régions dans les prochaines centaines de milliers d'années est appréciée au regard de l'histoire géologique passée sur les dix derniers millions d'années. Cette période inclut l'histoire quaternaire (soit deux millions d'années) caractérisée par l'installation du régime climatique actuel.

5.1. Les phénomènes géodynamiques internes

En termes de géodynamique interne et de tectonique des plaques, les régions granitiques du Massif Central et du Massif Armoricain se situent à l'écart de zones actives. Elles se caractérisent ainsi par des déformations de très faible amplitude, même à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années. Les mouvements verticaux du sol y sont très faibles et l'activité sismique réduite.

Tectonique des plaques : la France à l'écart des zones de fortes déformations

L'enveloppe superficielle rigide de la terre ou *lithosphère* est divisée en quelques vastes domaines (« plaques »), dont la déformation interne peut être considérée à cette échelle comme négligeable, séparés par des zones étroites où se concentrent les déformations. Ces plaques lithosphériques sont animées de mouvements relatifs les unes par rapport aux autres.

À cette échelle, la France appartient à la plaque « Eurasie », limitée par la plaque « Afrique » au sud et la zone d'ouverture de l'Atlantique à l'ouest. À l'échelle de la tectonique des plaques, les déformations se concentrent dans les zones alpines et méditerranéennes en limite avec la plaque « Afrique », ce qu'illustre la distribution des forts tremblements de terre qui y ont été inventoriés. Les zones granitiques du Massif Central ou du Massif Armoricain se situent à l'écart de ces zones de fortes déformations et sont ainsi protégées de mouvements tectoniques significatifs à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années.

5.1.1. La sismicité

Un contexte géodynamique très peu actif ne signifie pas l'absence totale de toute manifestation sismique, c'est-à-dire de tremblements de terre.

L'évaluation de « l'aléa sismique » en France a fait l'objet de nombreuses études qui fondent notamment le zonage sismotectonique de la France. Pour les études de stockage, l'évaluation de l'aléa sismique cumule les données enregistrées régulièrement depuis des décennies (« sismicité instrumentale »), les résultats des recherches sur les périodes historiques (« sismicité historique ») et les études de paléosismicité visant à retrouver sur le terrain la trace de séismes forts très anciens (milliers à centaines de milliers d'années) afin d'en évaluer l'intensité et la possible récurrence. Dans cette évaluation, les massifs granitiques du Massif Central et du Massif Armoricain se situent dans des zones à sismicité faible ou modérée. Dans un tel contexte, l'aléa sismique n'est pas un élément de dimensionnement d'un stockage. En effet, il est souvent constaté que les effets d'un tremblement de terre sont moindres dans le sous-sol qu'en surface. La surface « libre » du sol est totalement exposée aux effets des ondes sismiques venues de la profondeur alors que dans le sous-sol, la longueur des ondes sismiques et leur fréquence font qu'elles ne peuvent généralement pas induire de mouvements significatifs dans la roche ou les ouvrages souterrains.

L'évolution de la sismicité à long terme est en relation avec la cinétique de la tectonique des plaques. Sans changement prévisible du contexte à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années, il n'y a pas d'évolution sensible du niveau de sismicité à considérer pour le futur.

5.1.2. Le volcanisme

Dans les parties centrale et orientale du Massif Central existent des formations volcaniques. Géologiquement, l'activité volcanique a connu son paroxysme il y a environ 20 millions d'années. Le volcanisme était encore actif localement au quaternaire (2 millions d'années).

Si la cause même de ce volcanisme fait l'objet de débats scientifiques, il apparaît acquis que les points d'émission restent circonscrits dans des régions bien identifiées : chaîne des Puys, volcanisme de l'Ardèche pour les manifestations géologiquement les plus récentes (moins de 100 000 ans). Compte tenu de la dynamique très lente de ces mécanismes, il est admis que la création de nouvelles régions volcaniques est peu envisageable à l'échelle du prochain million d'années.

5.1.3. Pas d'évolution prévisible notable à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années

Au total, la lente évolution géodynamique des régions granitiques considérées dans le contexte géologique français fait que les conséquences sur un site granitique sont limitées.

Pour l'ensemble des massifs granitiques, il n'y a pas d'évolution prévisible à l'échelle de la dizaine de milliers d'années, ce qui répond à la RFS III.2.f qui préconise que « *pour une période qui doit être égale au moins à 10 000 ans, la stabilité [du site] (qui englobe une évolution limitée et prévisible) doit être démontrée* ».

À l'échelle de la centaine ou de quelques centaines de milliers d'années, le contexte géodynamique des régions considérées (Massif Central et Massif Armoricain) fait qu'une très faible évolution d'un site granitique est prévisible pour la majorité des massifs granitiques : les modifications des contraintes dans le sous-sol sont en effet trop faibles pour entraîner d'éventuelles modifications des propriétés hydrauliques des failles et des fractures. Des situations particulières liées à la proximité de grandes failles sismiques (comme le long des grands cisaillements du sud du Massif Armoricain) ou d'activité volcanique (Massif Central) peuvent nécessiter des examens spécifiques propres à quelques massifs granitiques.

Au-delà de quelques centaines de milliers d'années, la prise en compte de l'évolution géodynamique ne peut simplement relever de considérations générales. Elle est à examiner de façon spécifique au massif considéré. Cependant, un site de stockage, implanté à l'écart des grands accidents régionaux ou des quelques zones d'activité volcanique potentielle, et répondant en cela aux préconisations de la RFS III.2.f, serait très probablement soumis à de faibles modifications locales aux échelles de temps considérées.

5.2 Les phénomènes géodynamiques externes : érosion et changements climatiques

L'érosion est, à long terme, le principal facteur susceptible de modifier les conditions d'environnement d'un site de stockage. Cette érosion est principalement le fait du réseau hydrographique : fleuves, rivières, ruisseaux, etc. Elle résulte à la fois des mouvements du sol et des changements climatiques.

Changements climatiques

Les changements climatiques sont une composante naturelle de l'évolution de la terre. Depuis près de 7 millions d'années, il y a alternance de périodes glaciaires et interglaciaires aux latitudes du territoire français. Le dernier épisode glaciaire a atteint son paroxysme il y a 18 000 ans.

La théorie astronomique des climats lie ces changements climatiques aux oscillations des mouvements de la terre autour du soleil. Elle permet ainsi une prospective des changements climatiques futures et le retour à de nouveaux cycles glaciaires à l'échelle de la centaine de milliers d'années. Elle permet aussi une appréciation des conséquences éventuelles des activités humaines (« effet de serre ») qui tendraient à retarder cette récurrence glaciaire.

Les bilans effectués sur différentes régions conduisent à des estimations généralement voisines et de l'ordre de *5 à 20 mètres maximum par 100 000 ans* pour le creusement des vallées des rivières. Les taux d'érosion sur les plateaux sont beaucoup plus faibles. Ces phénomènes d'érosion, notamment le creusement des vallées, sont susceptibles de modifier de façon pérenne les gradients hydrogéologiques en profondeur et les trajectoires des écoulements hydrogéologiques vers des exutoires modifiés en surface. En lien avec la récurrence de climats glaciaires, l'installation d'un pergélisol sur les tranches supérieures et superficielles du massif granitique peut également modifier, de façon transitoire, les infiltrations d'eau et leur cheminement dans le massif.

Des conséquences limitées au niveau d'un stockage en profondeur

De façon générale, les modifications prévisibles à l'échelle de la *dizaine de milliers d'années* sont, pour l'ensemble des massifs granitiques français, très faibles et sans incidence significative au niveau d'un stockage en profondeur.

À l'échelle de la centaine ou de quelques centaines de milliers d'années, les changements climatiques prévisibles peuvent modifier, sur certains sites, les flux d'infiltration d'eau dans le massif et les gradients hydrauliques. Ce serait notamment le cas de sites littoraux susceptibles d'être affectés du point de vue hydrogéologique par le recul de la mer en périodes glaciaires. Ce peut être aussi le cas de sites du Massif Central qui seraient localement soumis à l'installation d'un pergélisol relativement profond (200 à 300 mètres).

Au-delà de quelques centaines de milliers d'années, les modifications à prendre en compte peuvent être plus importantes et les incertitudes correspondantes plus fortes, notamment vis-à-vis des trajectoires des écoulements entre la profondeur et la surface. Elles concernent des situations particulières comme celle des massifs granitiques du Massif Central dont l'hydrologie est ouverte vers la Méditerranée et qui sont susceptibles d'être affectés, sur le très long terme, par des phénomènes d'érosion plus intenses que ceux ouvrant sur le versant atlantique. De telles situations devraient être examinées de façon spécifique pour vérifier que les évolutions prévisibles ne seraient pas de nature à remettre en cause les conditions d'environnement favorables à un stockage en profondeur.

Dossier 2005 Granite

Descriptif de concepts de stockage en milieu granitique

4

p.84 > 1. L'architecture générale d'un stockage

p.90 > 2. Le stockage des déchets B, C et des combustibles usés

p.101 > 3. L'exploitation réversible du stockage

Les principes qui fondent la conception d'un stockage en milieu granitique ont été exposés au chapitre 2 : une architecture permettant de mobiliser les propriétés favorables du granite, des éléments ouvragés aux fonctions complémentaires et redondantes avec celles de la barrière géologique, un dimensionnement limitant les perturbations du milieu granitique et prenant en compte la variabilité des caractéristiques des granites français.

Ce chapitre présente un descriptif des concepts de stockage proposés. Il ne s'agit pas, dans un contexte d'études génériques, de décrire précisément des architectures qui ne pourraient être définies que par rapport à un site donné. Les concepts retenus constituent des solutions possibles, permettant de vérifier leur réalisme d'un point de vue technologique. Ces concepts de référence sous-tendent aussi les analyses phénoménologiques et de sûreté qui ont été réalisées avec un systématisme suffisant pour s'assurer que l'ensemble des questions relatives à la conception d'un stockage en milieu granitique a pu être examiné.

L'architecture générale d'un stockage est décrite dans ses principes, notamment les dispositions qui permettent son adaptation aux configurations géologiques susceptibles d'être rencontrées dans le contexte français.

Les options techniques retenues pour le stockage de chacune des catégories de déchets sont ensuite présentées ainsi que les composants des différentes zones de stockage pris comme références dans les études (colis, alvéoles et modules de stockage).

Dans une dernière partie, les questions relatives à l'exploitation réversible d'un stockage en milieu granitique sont examinées. Il y est vérifié qu'en première approche, à ce stade du projet, il n'existe pas d'éléments rédhibitoires vis-à-vis de la faisabilité des différentes opérations à prévoir pour assurer l'exploitation du stockage dans une logique de réversibilité.

1 L'architecture générale d'un stockage

De façon générale, un stockage comprend des installations de surface, des ouvrages d'accès depuis la surface jusqu'aux niveaux de stockage et des installations souterraines nécessaires au stockage des colis : galeries de liaison et de reconnaissance, infrastructures communes, modules de stockage.

1.1 Les installations de surface

Les installations de surface comprennent les bâtiments d'accueil des colis primaires, les ateliers de préparation des colis de stockage ainsi que des entreposages tampons pour réguler les flux des procédés industriels. Les installations comprennent aussi des équipements industriels classiques en soutien aux activités de construction et de fonctionnement des installations souterraines du stockage. En particulier, les déblais issus du creusement des installations souterraines sont entreposés sur une verse ; ils seront ensuite partiellement employés comme matériau de remblai.

1.2 Une architecture générale des installations souterraines adaptée à la structure du granite

Vis-à-vis de la sûreté à long terme, l'architecture des installations souterraines est d'abord conçue pour *mobiliser les propriétés favorables du milieu granitique*, notamment la résistance de la roche et sa faible perméabilité dans des « blocs » où elle est peu ou pas fracturée.

Pour s'assurer de l'efficacité de ces dispositions architecturales, même en cas de défaillance partielle, les ouvrages sont remblayés et scellés par des dispositifs qui remplissent des *fonctions complémentaires et redondantes avec celles du granite*.

Les dispositions architecturales proposées visent aussi à limiter les perturbations des propriétés du milieu granitique qui pourraient affecter ses performances de confinement.

Les ouvrages de liaison surface-fond (puits ou descenderies) ou entre modules de stockage (galeries de liaison) assurent le transfert des différents flux : celui lié aux travaux (excavation des déblais, apport des matériaux de construction), celui de l'air de ventilation et celui des déchets à stocker. La distribution et le nombre des galeries de liaison sont déterminés pour assurer, en toute sécurité, la coactivité de travaux de construction et d'exploitation (nucléaire) dans le stockage. Le principe est d'exclure la simultanéité d'activités de construction et d'exploitation dans une même galerie.

Les dispositions architecturales proposées assurent la réversibilité de l'exploitation du stockage, c'est-à-dire la possibilité de retirer les colis de déchets, d'agir sur le processus de stockage et de faire évoluer la conception des ouvrages.

1.2.1 Les dispositions architecturales générales

Les dispositions architecturales étudiées peuvent s'appliquer dans leurs principes à l'ensemble des granites français. Cependant, sur un site particulier, il serait nécessaire de préciser l'architecture et son dimensionnement en tenant compte des caractéristiques spécifiques du massif granitique investigué.

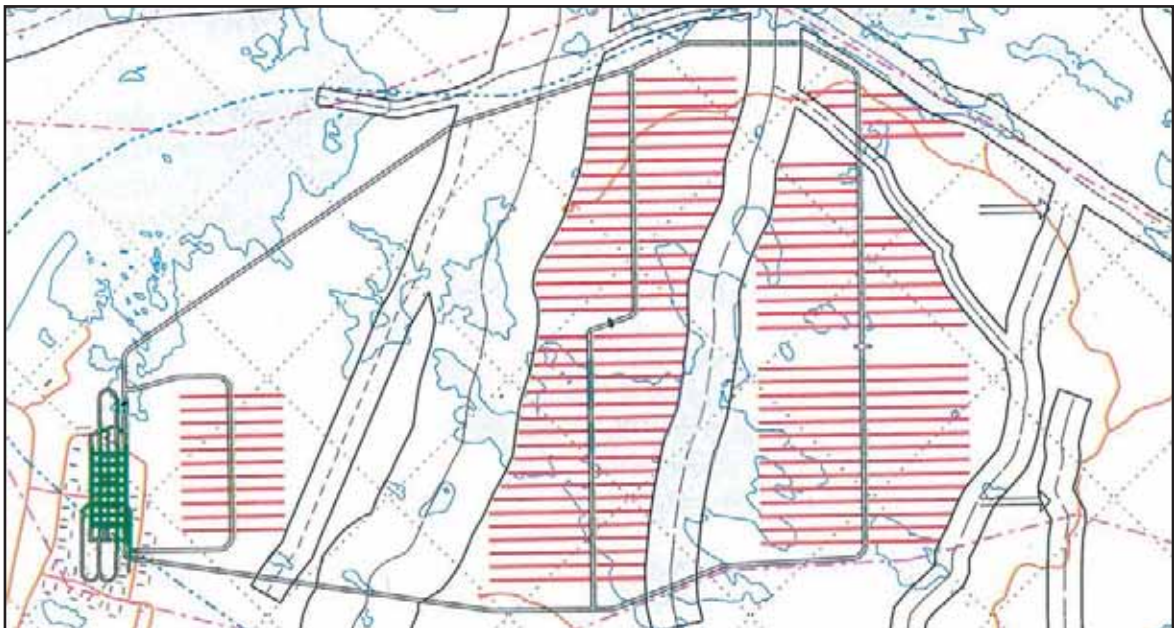
• Une architecture modulaire adaptée à la fracturation du granite

L'architecture générale des installations souterraines est adaptée à la structure du granite encaissant. Les modules de stockage sont implantés dans les « blocs » de granite à l'abri des failles conductrices d'eau. Une distance de garde de plusieurs dizaines de mètres (selon les caractéristiques locales du granite) est préservée entre modules et failles. Les distances entre modules sont généralement de l'ordre de la centaine de mètres. L'architecture générale d'un stockage dépend de la distribution des « blocs » dans le massif granitique hôte du stockage.

Les zones de stockage qui regroupent les modules de stockage d'une même catégorie de déchets (B, C), voire de combustibles usés dans le cas où leur stockage serait envisagé, sont distinctes.

Pour éviter des interactions, notamment chimiques, entre des colis de déchets de nature différente, chaque module de stockage regroupe des déchets d'un même type. Par exemple, les déchets B contenant des matières organiques sont stockés dans des modules dédiés.

Le principe de modularité de l'architecture d'un stockage a été adopté de façon analogue au niveau international par les différents organismes conduisant des études sur le milieu granitique : Suède (SKB), Finlande (Posiva), Canada (AECL), Espagne (Enresa)...



Architecture modulaire de stockage étudiée par SKB (Suède)

De façon générale, une architecture modulaire de stockage, par son fractionnement, renforce la sûreté en limitant les conséquences de défaillances éventuelles au périmètre du module. Elle est aussi un élément important d'une gestion réversible, car elle offre la possibilité d'une approche phasée pour les opérations de reconnaissance, de construction, d'exploitation et de fermeture du stockage.

• **La possibilité d'une architecture sur plusieurs niveaux**

Un massif granitique représente généralement pour un stockage un vaste volume de roche en profondeur entre 300 et 1 000 mètres. Ceci offre de la flexibilité pour adapter l'architecture à la fracturation du granite. Des architectures sur plusieurs niveaux sont ainsi possibles, comme cela a été étudié en Suède pour un site théorique « Aberg » modélisé à partir des données du laboratoire d'Äspö.

L'analyse des avantages et contraintes d'une architecture à deux niveaux souligne son intérêt ; une distance d'environ 100 mètres entre chaque niveau permet d'éviter des interactions thermiques entre les modules de stockage de déchets C ou de combustibles usés et de garantir le respect des critères de température maximum dans les alvéoles de stockage.

• **Des ouvrages de liaison surface-fond (puits ou descenderies) implantés en fonction du contexte hydrogéologique du site.**

Des puits ou des descenderies peuvent être envisagés pour relier la surface et les niveaux de stockage en profondeur. Ils sont généralement prévus de façon complémentaire dans la conception d'un stockage. Par exemple, en Finlande, l'ouvrage de reconnaissance « Onkalo », susceptible de devenir un accès au stockage des déchets, a une descenderie comme ouvrage principal de liaison entre la surface et le fond.

Le nombre et le dimensionnement des puits et des descenderies sont adaptés aux fonctions de transfert qui leur sont attribuées et aux flux correspondants : évacuation de la roche excavée pendant le creusement des ouvrages, transfert de matériaux, des colis de stockage, des personnes, ventilation.

Vis-à-vis de la sûreté à long terme, ces ouvrages sont implantés en fonction du contexte hydrogéologique du site pour les empêcher de constituer des drains du stockage vers la surface. Les accès des puits et/ou des descenderies peuvent aussi être regroupés dans une même zone pour limiter les effets hydrauliques entre ouvrages et renforcer la maîtrise du schéma hydraulique dans le stockage.

• **Un remblaiement systématique des ouvrages, des scellements multiples**

Les ouvrages de liaison surface-fond et les galeries du stockage peuvent recouper des failles conductrices d'eau. Ils sont donc remblayés pour protéger les modules de stockage des circulations d'eau qui pourraient en résulter. Des scellements mis en place dans des points clés des galeries empêchent aussi les venues d'eau pouvant provenir des failles recoupées par les galeries. Remblais et scellements ont ainsi des fonctions complémentaires et redondantes vis-à-vis de la sûreté à long terme. Leurs spécifications précises dépendent des caractéristiques d'un site granitique. Dans le contexte des études à caractère générique du projet granite, les deux dispositions ont été examinées et retenues pour l'ensemble des zones de stockage.

Des remblais sont systématiquement prévus dans les ouvrages de liaison jour-fond et les galeries du stockage. Par principe, l'exigence de performance hydraulique des remblais est d'autant plus grande que les galeries sont proches des déchets. Dans les modules de stockage, les galeries sont remblayées par un matériau de faible perméabilité. A l'extérieur, la perméabilité des remblais des galeries et des ouvrages de liaison surface-fond est fixée en fonction de la conductivité des fractures susceptibles d'être recoupées et de l'endommagement de la roche en paroi provoqué par le creusement.

Des scellements de très faible perméabilité et durables sur de longues périodes sont prévus systématiquement entre les failles conductrices d'eau et les modules de stockage implantés dans des « blocs » de granite peu perméables. Selon la configuration du site, des scellements peuvent être prévus dans les ouvrages de liaison surface-fond ou les galeries de liaison du stockage pour limiter les venues directes d'eau provenant de la partie superficielle du granite la plus perméable.

La conception des scellements et des remblais privilégie des matériaux qui limitent les éventuelles perturbations pour les propriétés des fractures, lieu privilégié de transfert et de rétention des radionucléides dans le granite. Notamment, les appuis en béton des scellements peuvent être réalisés en béton bas pH pour limiter l'alcalinité des eaux du stockage.

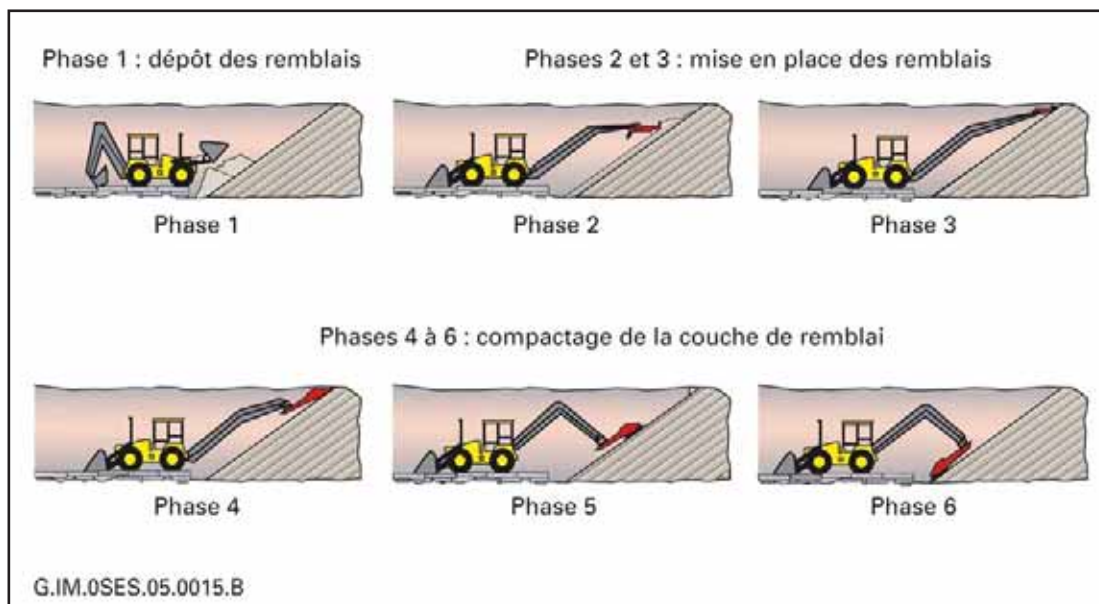
Remblais et scellements sont deux moyens complémentaires et redondants pour protéger les ouvrages de stockage des circulations convectives d'eau.

Les techniques de fermeture des ouvrages de liaison ont fait l'objet d'expérimentations dans des laboratoires souterrains étrangers, notamment d'Äspö (Suède) et du Lac du Bonnet (Canada). Ces expériences démontrent la faisabilité technologique de tels ouvrages et en précisent le niveau de performance.

La réalisation de remblais de faible perméabilité

Un remblai constitué uniquement de granite broyé, ne peut, même après compactage, être doté d'une perméabilité suffisamment faible pour répondre à la fonction hydraulique requise. De plus, il faut assurer un contact intime entre le remblai et la roche, notamment en voûte des galeries, pour ne pas créer une voie de transfert privilégiée le long de cette interface.

Pour répondre à ces exigences, l'option technique proposée consiste en remblais constitués en partie d'argile gonflante (bentonite). La proportion, de 10 à 30 %, peut être adaptée aux conditions hydrogéologiques du site et ajustée en fonction de la situation de la galerie dans l'architecture générale du stockage. L'argile gonflante contribue à la fois à la faible perméabilité du remblai et, par son gonflement, au contact avec la roche. La difficulté du remblaiement en voûte d'une galerie a été résolue par SKB qui a développé une machine dotée d'une plaque vibrante montée sur un bras mobile. Le compactage permet d'obtenir des densités du remblai de 1,7 au cœur et de 1,5 en périphérie, en accord avec la recherche de faibles perméabilités (perméabilité de l'ordre de 1.10^{-12} m/s pour une densité de 1,7 ; perméabilité de l'ordre de 5.10^{-10} m/s pour une densité de 1,5).



Principe de mise en place d'un remblai de faible perméabilité

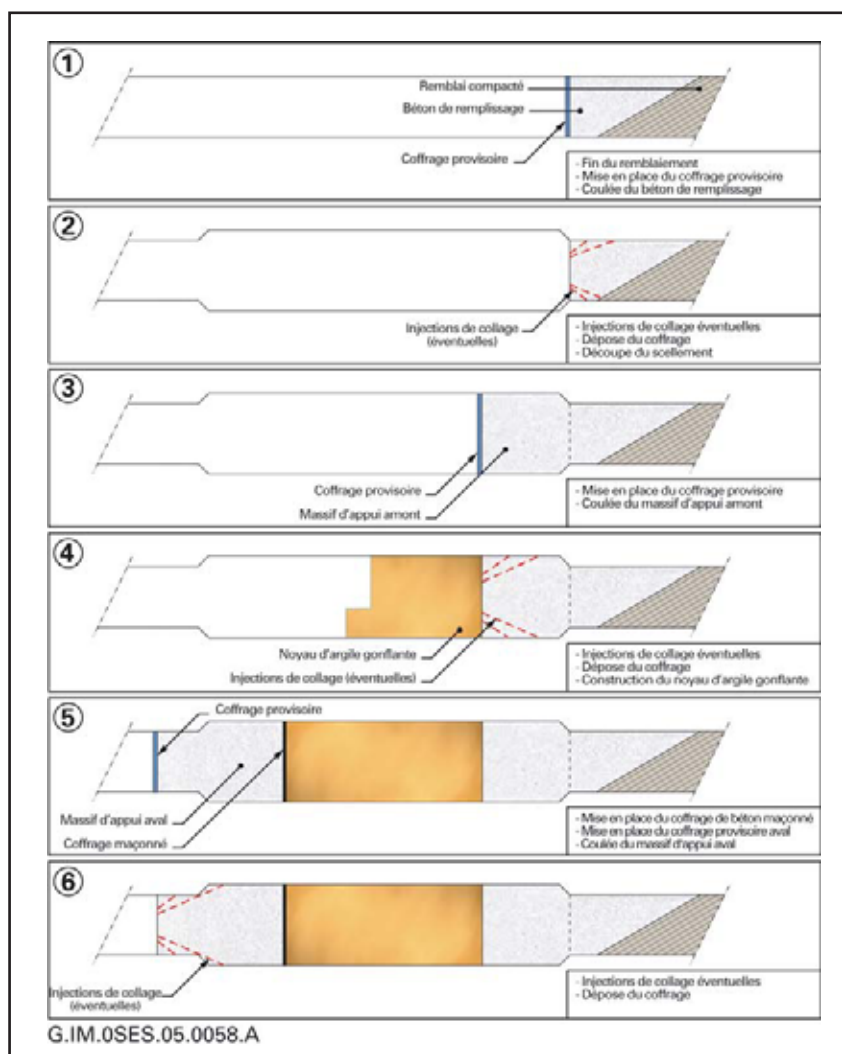
La mise en place de scellements de très faible perméabilité

En complément aux remblais systématiquement mis en place dans les galeries, des scellements sont implantés en des points particuliers du stockage, plus particulièrement entre les failles significativement conductrices d'eau recoupées par les galeries et les ouvrages de stockage.

Les scellements sont constitués d'un noyau en argile gonflante bentonitique de 10 à 15 mètres de longueur. Le noyau d'argile s'appuie sur deux massifs en béton assurant la reprise des contraintes liées au gonflement de l'argile bentonitique ainsi que le maintien du noyau en pression.

La faisabilité de la construction d'un noyau d'argile a été démontrée par plusieurs expériences en laboratoires souterrains étrangers. Elle consiste en l'empilement de « briques » d'argile jointives. L'expérience « Tunnel Sealing Experiment –TSX » à l'échelle 1 dans le laboratoire Lac du Bonnet (Canada) a évalué la performance hydraulique d'un scellement *in situ* : la perméabilité globale mesurée est très faible, de l'ordre de 10^{-11} m/s. L'expérience a aussi souligné l'importance de la qualité du contact avec la roche.

Pour assurer un contact intime entre la roche saine et le noyau d'argile, on prévoit de découper la zone de scellement dans la roche en paroi au-delà de l'endommagement produit par l'excavation de la galerie. La réalisation des massifs d'appui en béton ne pose pas de question particulière. Pour éviter une dégradation éventuelle des performances du noyau d'argile due à l'alcalinité du béton, on peut utiliser des bétons « bas pH » dont la mise en œuvre a aussi été testée *in situ* dans le laboratoire souterrain du Canada.



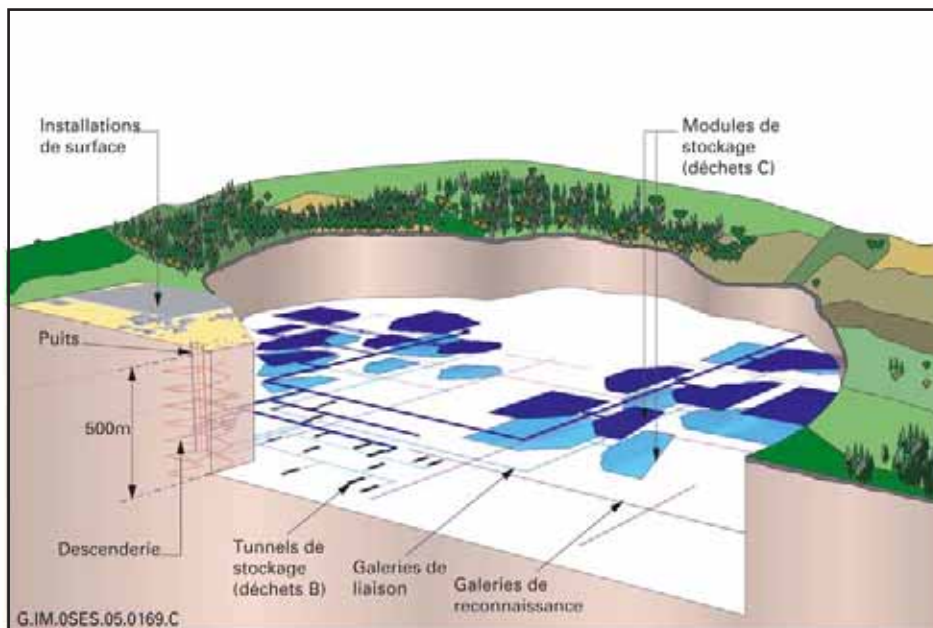
Principe de construction d'un scellement

1.2.2 L'architecture de référence et les éléments d'adaptation à différentes configurations géologiques de site

• L'architecture de référence

L'architecture de stockage retenue comme référence est une architecture sur deux niveaux susceptible d'être adaptée au plus grand nombre de configurations dans le contexte géologique français (figure ci-dessous). Les deux niveaux sont distants d'environ 100 mètres.

Une disposition sur deux niveaux réduit l'emprise du stockage et facilite la reconnaissance « à l'avancement » du granite qui est effectuée pendant le stockage pour positionner les modules. Ceci concerne tant la mise en œuvre des outils de reconnaissance que l'interprétation des données et la modélisation géologique du granite. Dans la plupart des configurations géologiques des granites français, la connaissance d'un niveau est en effet transposable, à l'échelle d'une centaine de mètres, au niveau voisin.



Vue d'ensemble d'un stockage en milieu granitique : installations de surface et installations souterraines sur deux niveaux

Le nombre d'ouvrages de liaison entre la surface et le fond dépend du choix de la solution technique. Une solution « tous puits » nécessiterait raisonnablement 4 puits (diamètre de 10 mètres environ). Une solution avec une descenderie (largeur de 6 à 8 m) pour les opérations de construction nécessiterait 3 puits.

Le réseau de galeries souterraines comprend un « faisceau » de plusieurs galeries parallèles (3 à 5 selon les zones de stockage) pour séparer les flux des activités de construction et ceux des activités d'exploitation nucléaire tout au long du processus de stockage.

• L'adaptation à différentes configurations géologiques de site

Plusieurs éléments peuvent être adaptés aux différentes configurations des sites granitiques français.

Les zones de stockage des catégories de déchets peuvent être distribuées à des profondeurs différentes pour s'ajuster aux conditions thermiques du site. Elles peuvent être plus ou moins distantes entre elles selon la grande fracturation du site.

Les ouvrages de liaison surface-fond peuvent être plus ou moins regroupés en fonction de la distribution des zones de stockage et du contexte hydrogéologique du site. Le choix entre puits et descenderies pour les transferts de matériaux et de colis peut aussi dépendre des conditions de site (topographie, qualité des parties superficielles du granite...).

Le nombre et la distribution des galeries de liaison dépendent, *in fine*, de l'implantation des différentes zones de stockage dans le granite et de la profondeur des niveaux de stockage qui serait retenue.

2 Le stockage des déchets B, C et des combustibles usés

Pour tous les déchets, la conception des modules de stockage se fonde en premier lieu sur une implantation des alvéoles dans la roche granitique très peu perméable, à l'abri des failles conductrices d'eau.

Cependant, les emprises à prendre en compte dans l'architecture générale du stockage sont, selon les différents types de déchets en particulier leur volume et leurs propriétés thermiques, plus ou moins contraintes par la distribution des failles conductrices d'eau dans le granite. Les combustibles usés impliquent, par leur thermicité, des emprises importantes. C'est aussi, dans une moindre mesure, le cas d'une grande partie des déchets C. Les déchets B, non ou peu exothermiques, sont susceptibles d'un mode de stockage plus compact sur une faible emprise.

Par ailleurs, la diversité de la nature physico-chimique des déchets (boues bitumées, verres, déchets métalliques...) leur confère une plus ou moins grande capacité à retenir les radionucléides. Ces différences conduisent à des exigences plus ou moins fortes, en termes de performances de confinement et de durabilité, pour le colisage des déchets et les barrières ouvragées des alvéoles de stockage.

Ainsi, les colis de stockage, les barrières ouvragées, les remblais et les scellements des galeries des modules de stockage sont conçus et dimensionnés de façon spécifique à chaque type de déchets. Ils dépendent du mode d'implantation des modules dans le granite et de la nature physico-chimique des déchets.

2.1 Le stockage de déchets B

Le volume des déchets B, environ 80 000 m³, conduit à retenir des solutions assurant une certaine compacité du stockage des colis dans les alvéoles. Ceci limite le nombre d'alvéoles et le volume de roche à excaver ainsi que le nombre de blocs de granite très peu perméables nécessaires pour implanter les tunnels de stockage.

Par ailleurs, la diversité des déchets conduit à ne regrouper dans une même alvéole que des colis de déchets compatibles entre eux. Cette compatibilité concerne la nature chimique des déchets, leur thermicité, la possible production de gaz.

Plusieurs types de regroupement sont prévus :

- des alvéoles stockant des déchets contenant des composés organiques ou de la matière organique qui sont susceptibles de produire des espèces complexantes lors de leur altération par l'eau,
- des alvéoles de déchets bitumés (B2),
- des alvéoles stockant des déchets sans matière organique, mais produisant de l'hydrogène par radiolyse du béton des colis primaires cimentés, ou conditionnés en coque béton (la plupart des déchets B3 et B4),
- des alvéoles correspondant à des déchets faiblement exothermiques (B1 et B5) sans matière organique et ne dégageant pas de gaz.

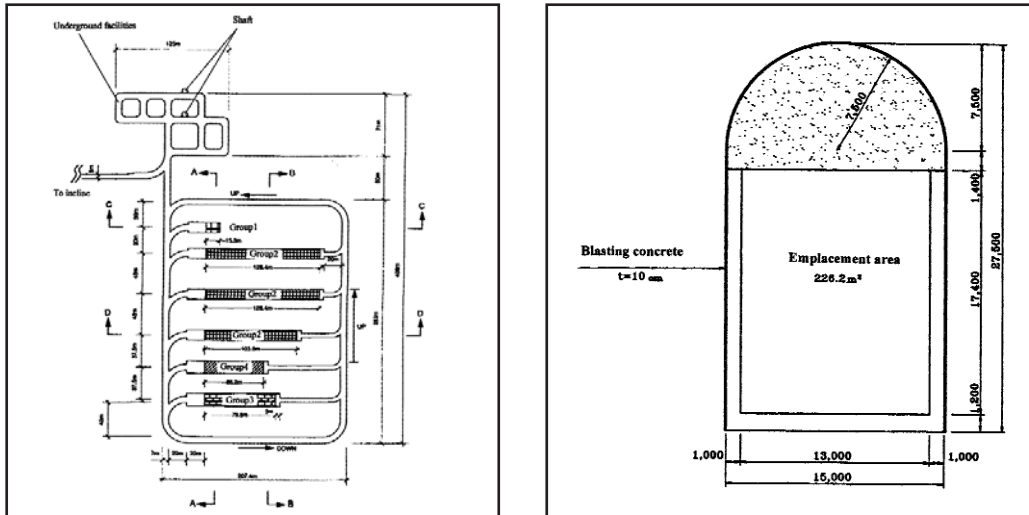
Partant ainsi d'une conception commune de l'alvéole de stockage, les dimensionnements et le colisage des déchets sont adaptés à chacune de ces configurations d'alvéoles.

2.1.1 L'alvéole de stockage B de référence : tunnel pour colis empilables

Différentes architectures ont été envisagées pour les alvéoles de déchets B. La recherche de compacité conduit à examiner la possibilité d'alvéoles en « silos » verticaux et cylindriques de grande hauteur (trentaine de mètres) comme ceux retenus pour le stockage de déchets à vie courte en Finlande (Olkiluoto et Loviisa) et en Suède (Forsmark). Cette option n'a pas été retenue à ce stade, du fait des difficultés vis-à-vis d'empilements de grande hauteur (stabilité, risque de chute de colis lors de la mise en place...).

Il a été ainsi privilégié des architectures horizontales d'alvéoles en tunnels, option également étudiée par le Japon et la Suède pour des déchets à vie longue équivalents aux déchets B.

Descriptif de concepts de stockage en milieu granitique



Architecture générale d'un stockage profond de déchets TRU en roches cristallines et tunnel de stockage de déchets bitumés ou de faible activité (Japon)

• Les tunnels de stockage B

La solution proposée pour l'alvéole de déchets B est un tunnel horizontal où sont empilés sur plusieurs rangées des colis de stockage. Les tunnels sont borgnes : leur fond, limité par la roche granitique, ne débouche pas sur une galerie du stockage. Cette disposition réduit les circulations d'eau dans les alvéoles de stockage.

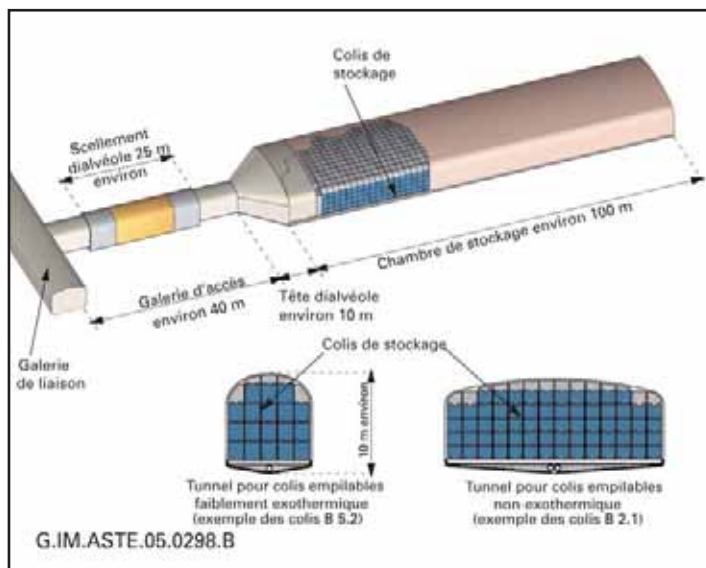
Les longueurs des tunnels, qui varient de 70 à 200 mètres, sont adaptées d'une part aux caractéristiques et à l'inventaire des différents types de déchets, d'autre part à la fracturation du granite.

Compte tenu des propriétés mécaniques d'un granite, les tunnels peuvent être d'assez grande section (largeur de 10 à 20 mètres), ce qui contribue à la compacité du stockage.

Pour les déchets faiblement exothermiques (B1 et B5), le dimensionnement prend aussi en compte des critères de température liés d'une part à la maîtrise du comportement des colis en béton à long terme, d'autre part à celle du comportement des radionucléides dans les alvéoles. La température maximum retenue est de 70°C (sans tenir compte de l'évacuation de la chaleur par la ventilation des alvéoles).

Les hauteurs des tunnels sont d'une dizaine de mètres ; les largeurs d'une dizaine de mètres pour les déchets B faiblement exothermiques (B1, B5) et d'une vingtaine de mètres pour les déchets non exothermiques (B2, B3).

La construction des tunnels de stockage relève de techniques minières classiques avec usage d'explosifs, la technique de « tirs adoucis » permettant de réduire l'endommagement de la roche en paroi. La hauteur des tunnels conduit à prévoir une excavation étagée en deux temps.



Alvéole de stockage pour colis empilables de déchets B

La chambre de stockage constitue un volume irradiant dans lequel les colis sont manutentionnés par un équipement téléopéré. La tête des alvéoles est équipée d'un sas de radioprotection pour les opérations de manutention.

Au besoin, il est possible au besoin placer entre les colis et la voûte rocheuse des éléments en béton de forme adaptée pour remplir les vides subsistant et protéger les niveaux les plus élevés des empilements de colis d'éventuels suintements d'eau en voûte.

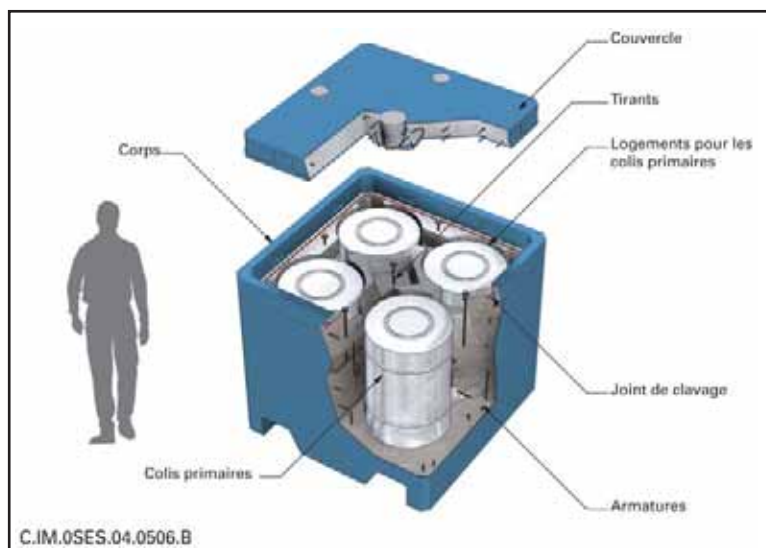
Lors de la fermeture de l'alvéole, le volume occupé par le sas est rempli ; la galerie d'accès est scellée par un bouchon en argile gonflante de très faible perméabilité.

• Les colis de stockage

La conception des colis de stockage est identique à celle proposée pour le stockage en milieu argileux.

La simplification des méthodes d'exploitation et la récupérabilité des colis conduisent à la conception de colis standardisés en béton et parallélépipédiques.

Selon le conditionnement initial des déchets, les colis de stockage regroupent 1 à 4 colis primaires. Leur masse est comprise entre 6 et 25 tonnes environ, leurs dimensions entre 1,20 et 3 mètres. Les colis de stockage sont manutentionnés par un engin de type « chariot élévateur ». Leur conception permet de faire face à des risques de chute lors de leur empilement sur plusieurs niveaux dans les tunnels de stockage.



Conteneur de stockage standard

Le corps et le couvercle sont préfabriqués (technique de moulage) en béton armé ou fibré, dont la formulation est choisie pour leur conférer de bonnes performances et une grande durabilité.

Pour les déchets produisant de l'hydrogène, l'enveloppe en béton est conçue pour évacuer le gaz et éviter toute surpression de gaz risquant d'endommager les colis.

Pour les déchets les plus radioactifs ne dégageant pas de gaz (colis B1 et B5), un conteneur, avec une capacité de confinement renforcée d'une dizaine de milliers d'années au moins, a été étudié. Cette performance nécessite une très faible perméabilité de l'enveloppe, un très faible coefficient de diffusion à l'échelle du colis et une intégrité mécanique à long terme.

Plusieurs solutions ont été examinées : elles sont basées sur l'utilisation d'une seule formulation en béton pour tous les composants du colis, l'absence d'armatures et le renforcement en fibres. Des démonstrateurs d'un tel conteneur ont été réalisés, montrant leur faisabilité. Les propriétés en termes de performance font encore l'objet d'un programme de test et de qualification au cours de l'année 2005. L'agence japonaise RWMC a également étudié une solution voisine et réalisé avec succès un démonstrateur.

Ces divers résultats confirment les perspectives ouvertes pour la conception de colis de stockage de déchets B en béton ayant des performances hydraulique et de transport. Ils montrent la possibilité d'atteindre des performances de confinement durable pendant une dizaine de milliers d'années. En milieu granitique, ceci contribue à répondre aux exigences de robustesse d'un stockage en termes de sûreté à long terme, pour un grand nombre de configurations de sites dans le contexte géologique français.

Le conteneur à capacité de confinement renforcée

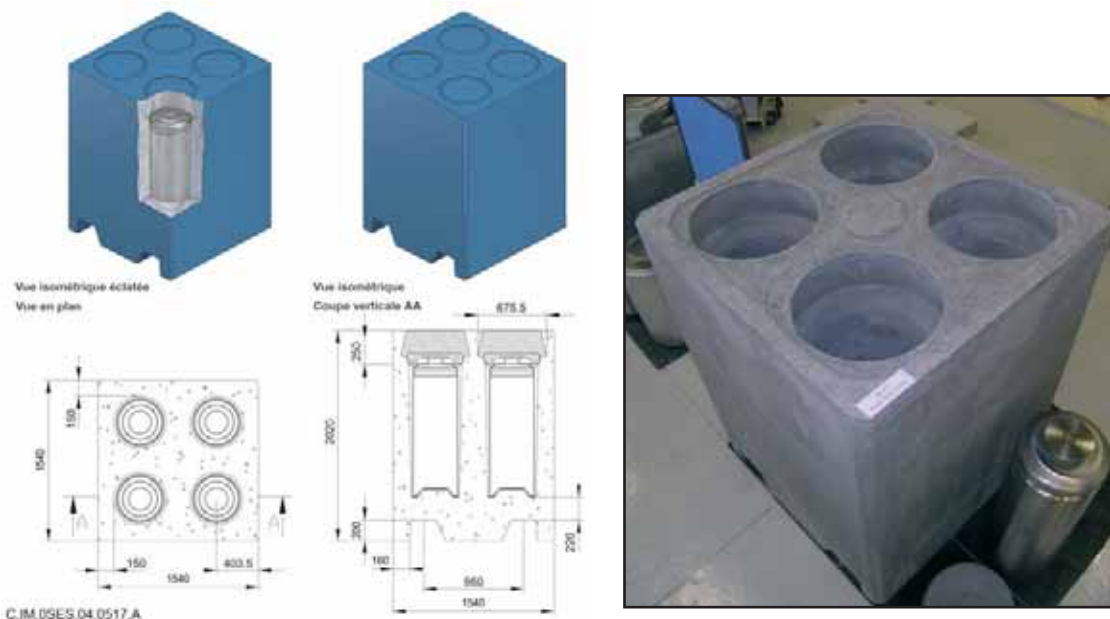
L'analyse de la répartition de l'activité radiologique entre colis a montré l'intérêt d'étudier la faisabilité d'un conteneur de stockage doté d'une performance de confinement supplémentaire pour certains colis (B1 et B5.2) qui représentent une partie importante de l'inventaire radioactif des déchets B pour certains radionucléides (nobium 94, zirconium 93, césium 135...). Le conteneur doit être durable sur de longues périodes (10 000 ans au moins) et offrir une résistance mécanique sur ces mêmes durées.

La performance accrue de confinement mobilise les propriétés hydrauliques et de transport (diffusion, rétention) du béton pour limiter et retarder la migration des radionucléides relâchés par les colis primaires. Le conteneur comporte :

- un corps préfabriqué avec 4 logements ajustés à la taille des colis primaires,
- 4 tapes individuelles préfabriquées qui obturent les logements après mise en place des colis primaires et assurent le coffrage inférieur pour la coulée des couvercles individuels,
- 4 couvercles coulés au-dessus des 4 logements.

La performance du confinement est essentiellement déterminée par celle du corps et par la qualité de la liaison entre le couvercle coulé et le corps préfabriqué (béton BHP 90 MPa fibré inox et dépourvu d'armatures).

Un démonstrateur d'un tel conteneur a été réalisé en commun par l'Andra et le CEA.

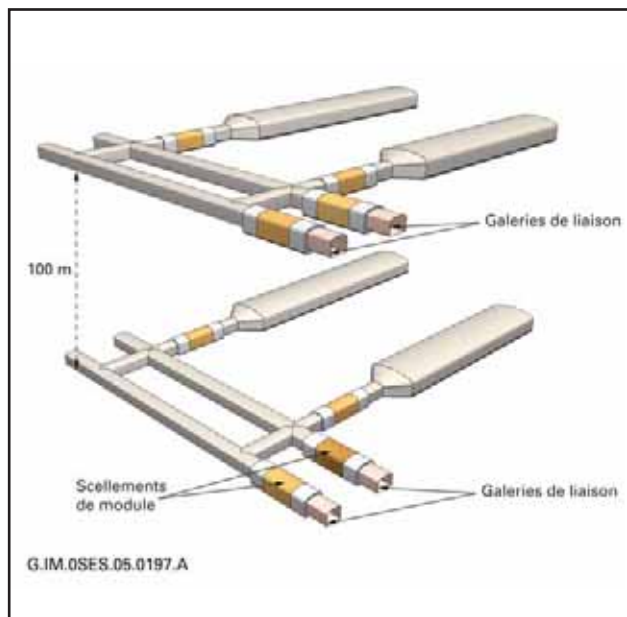
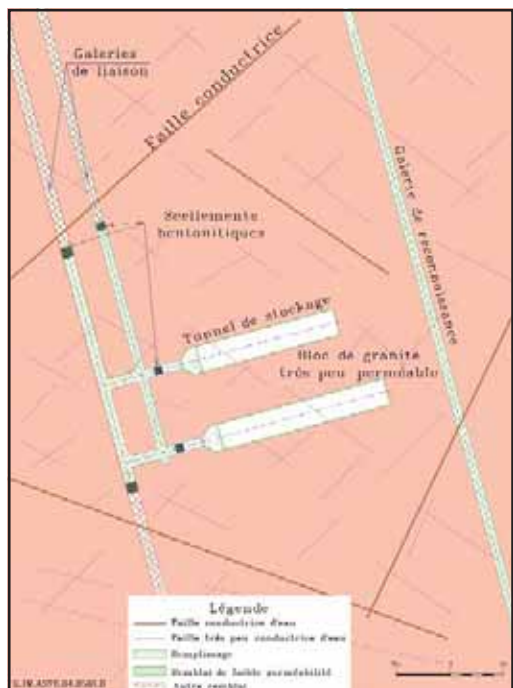


C.IM.05ES.04.0517.A
Conteneur de stockage à capacité de rétention renforcée

2.1.2 L'architecture d'une zone de stockage de déchets B

L'implantation des tunnels de stockage B dans le granite dépend de la distribution des failles conductrices d'eau qu'il faut éviter pour protéger les colis. L'orientation, l'extension et les connexions des failles entre elles dépendent du site et varient d'une configuration géologique à l'autre. Le choix de concepts en tunnels permet d'adapter le nombre, la longueur et l'orientation des tunnels au mode de fracturation du granite et aux régimes de contraintes naturelles dans le sous-sol. Une distance de garde (quelques dizaines de mètres) entre les tunnels et les failles conductrices d'eau est définie en fonction des propriétés hydrauliques de la roche granitique constituant le « bloc » où sont implantés les tunnels de stockage.

Un stockage sur deux niveaux optimise l'utilisation du volume de roche peu perméable disponible entre les failles conductrices d'eau.



Principe d'implantation d'alvéoles de stockage de déchets B

Le nombre de tunnels nécessaire pour stocker l'inventaire de déchets retenu pour l'étude varie entre 20 et 30 selon les scénarios de production (scénario avec retraitement complet S1a ou scénario avec arrêt du retraitement S2) et les longueurs de tunnels (100 m environ). Sur la base d'une implantation de 2 à 4 tunnels par « bloc » de granite, le stockage nécessite la caractérisation d'une douzaine de blocs. Selon le site, les « blocs » peuvent être plus ou moins distants. L'analyse typologique des massifs granitiques montre que, pour la plupart des configurations géologiques étudiées, les « blocs » de roche granitique peu fracturée sont regroupés par « paquets ». Ceci permet de concevoir des architectures relativement peu dispersées pour la zone de stockage de déchets B.

2.2 Le stockage de déchets C

La conception du stockage des déchets C est liée à leur thermicité et à la nature de leur conditionnement (matrice de verre).

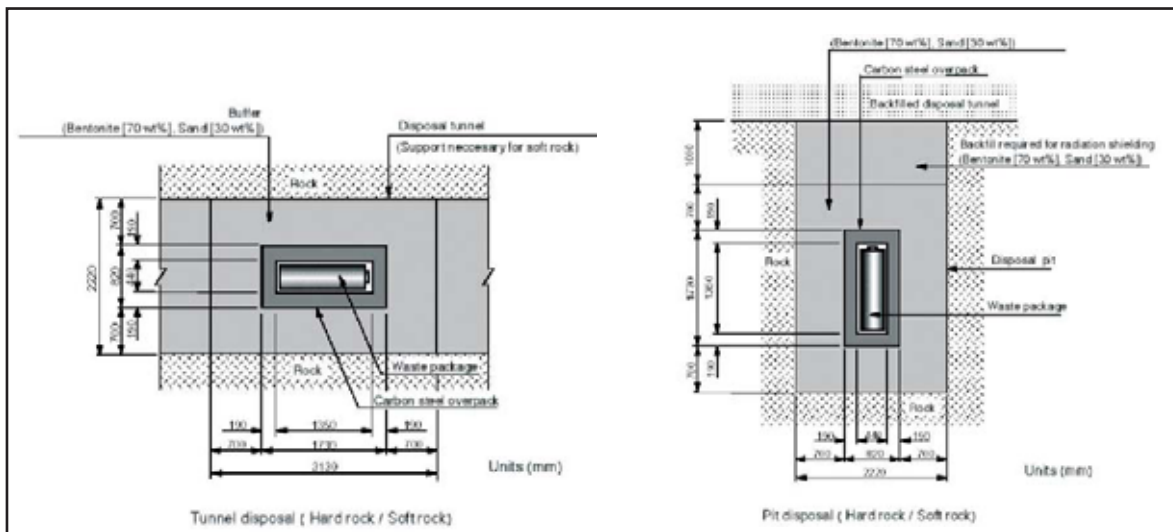
La gestion du dégagement thermique des déchets C est un élément de conception important du stockage. La maîtrise du comportement du stockage passe par la prise en compte de critères de température au niveau de l'alvéole (90°C maximum) et conduit à limiter le nombre de colis par alvéole et à prévoir un écartement suffisant des alvéoles entre elles.

L'inventaire des déchets retenu pour l'étude conduit à une emprise du stockage suffisamment importante (quelques km²) du fait notamment des contraintes engendrées par les failles et les fractures conductrices d'eau du granite.

L'adaptation de l'architecture du module de stockage à la fracturation du granite se fait d'une part, à l'échelle des alvéoles de stockage qui sont implantées dans la roche granitique très peu fracturée, d'autre part à l'échelle du module qui est implanté à l'écart des failles conductrices d'eau.

La conception du stockage vise à mobiliser la matrice vitreuse des déchets C pour retenir les éléments radioactifs. L'objectif est de protéger le verre de l'eau et des interactions chimiques avec les autres composants du stockage. La conception prévoit ainsi une barrière ouvragée gonflante autour des colis et un surconteneur étanche aussi longtemps que la température au cœur du verre excède 50°C.

Ces principes de conception rejoignent ceux étudiés à l'étranger pour les déchets vitrifiés. Au Japon, le rapport H12 de 1999 présente un concept où le colis primaire (CSD-V) est protégé par un surconteneur en acier peu allié. Les surconteneurs sont stockés dans des alvéoles horizontales ou verticales d'environ 2,20 m de diamètre. Une barrière ouvragée constituée de blocs préfabriqués d'argile gonflante (avec 30 % de sable) est interposée entre le colis de stockage et le terrain. L'épaisseur de la barrière ouvragée varie de 30 à 70 cm en fonction de la géologie et de la résistance allouée au surconteneur.



Concepts JNC (Japon) pour le stockage des colis C (d'après le rapport H12)

2.2.1 L'alvéole de stockage C : petit puits avec surconteneur en acier et barrière ouvragée argileuse

Le choix entre alvéoles horizontales ou verticales dans le granite dépend de l'orientation et de la distribution de la petite fracturation susceptible d'affecter localement la très faible perméabilité de la roche. Dans le contexte géologique français, l'analyse de la petite fracturation montre qu'elle est le plus souvent plutôt verticale. Aussi, en référence, il a été retenu d'étudier le concept de puits vertical, ce qui limite statistiquement le nombre de petites fractures pouvant exister en paroi des alvéoles de stockage.

Sur un site, où la distribution de la fracturation serait plutôt horizontale, un concept horizontal pourrait être adopté avec les mêmes principes de conception : un surconteneur en acier et une barrière ouvragée argileuse gonflante.

• Le puits de stockage C

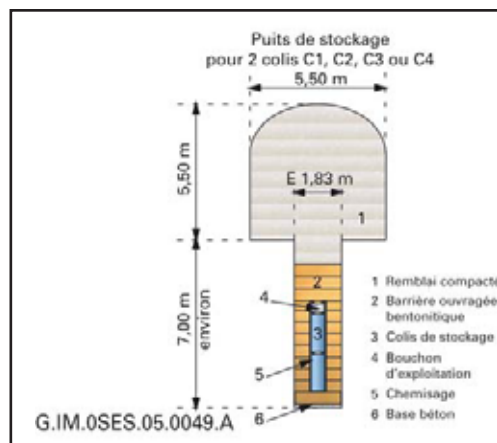
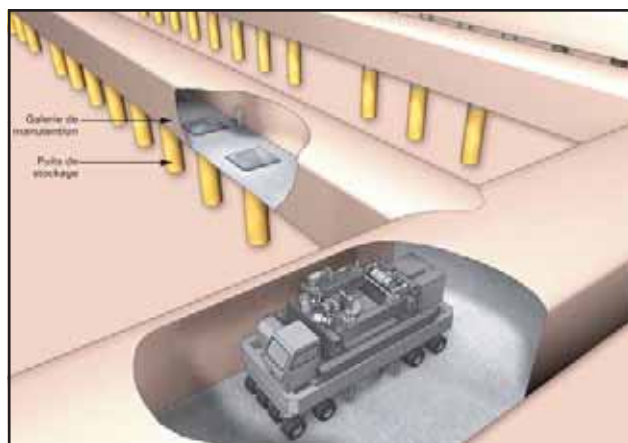
La solution proposée pour l'alvéole de déchets C est un puits, d'une longueur limitée à environ 12 mètres et d'un diamètre inférieur à 2 mètres, où une barrière ouvragée argileuse s'interpose entre les colis et la roche. La longueur des puits permet d'adapter leur implantation à la petite fracturation d'un granite pour l'ensemble des configurations envisageables dans le contexte français. Ces puits, de petit diamètre, peuvent être excavés par une machine de foration.

Le nombre de colis par puits dépend de la thermicité des déchets stockés. Pour les déchets C0 moyennement exothermiques, le stockage de 5 colis par puits respecte la longueur maximale envisagée et satisfait au critère de température maximale de 90°C au point le plus chaud de la barrière ouvragée. Pour les déchets C1 à C4 plus fortement exothermiques, un concept de 2 colis par puits permet de répondre à ce critère pour la plus grande majorité des granites français (après 60 ans de refroidissement en entreposage préalable).

Un chemisage en acier est intercalé entre la barrière ouvragée et les colis pour permettre leur mise en place dans les puits. Un jeu ménagé entre colis et chemisage facilite cette opération et leur éventuel retrait.

La barrière ouvragée contribue à assurer un mode de migration des éléments dissous dans l'eau par diffusion, même dans les cas d'une petite fracturation légèrement conductrice d'eau en paroi des puits. Les caractéristiques de la barrière ouvragée (pression de gonflement, densité, conductivité hydraulique, propriétés thermiques et plasticité) peuvent être ajustées aux conditions de site grâce à des compositions minéralogiques et des spécifications de fabrication adaptées. Les argiles gonflantes étudiées au niveau international, notamment l'argile gonflante MX 80 prise en référence dans de nombreuses études, peuvent s'adapter aux configurations du contexte français. Son épaisseur (60 cm) est fixée pour prendre en compte les éventuels phénomènes d'interactions chimiques avec le chemisage et les surconteneurs en acier à long terme.

Les puits de stockage sont borgnes : leur fond est sans accès avec une galerie des modules du stockage. Cette disposition limite les possibilités de circulation d'eau dans les puits. Vers le haut, ils débouchent sur une galerie de manutention dimensionnée pour assurer la mise en place des colis dans les puits de stockage.



Alvéoles de stockage de déchets C (deux colis par alvéole)

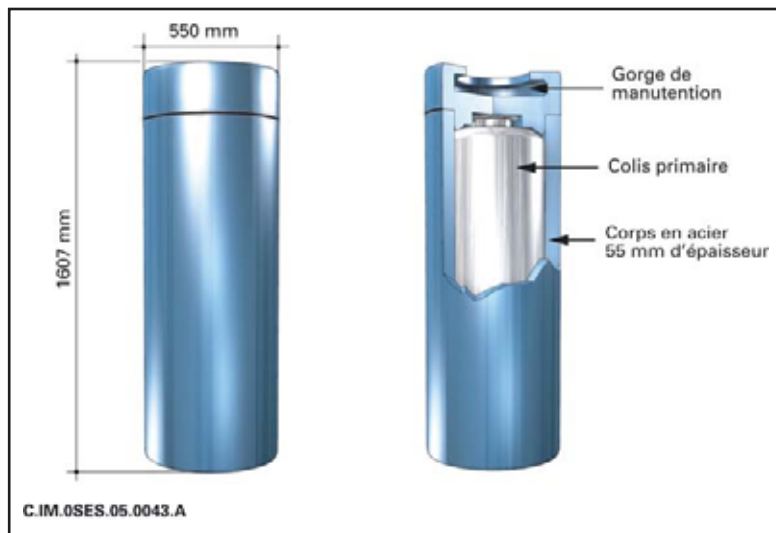
• **Le colis de stockage C : un surconteneur en acier noir**

La solution retenue à ce stade, pour sa simplicité et sa robustesse au regard des connaissances et des techniques actuelles, est identique à celle proposée pour le stockage en milieu argileux. Elle consiste en un surconteneur individuel en acier non allié.

Le surconteneur est composé d'un corps et d'un couvercle constitués du même matériau. Le système de préhension est intégré au couvercle de manière à limiter les vides résiduels extérieurs au colis.

L'épaisseur du conteneur (55 mm) est déterminée pour faire face aux phénomènes de corrosion susceptibles de se produire après la mise en place des colis. Elle assure l'étanchéité et sa tenue mécanique sur plusieurs milliers d'années (en tenant compte d'une contrainte d'une dizaine de MPa liée à la pression de l'eau et au gonflement de la barrière ouvragée).

Long de 1,6 mètre, le surconteneur a un diamètre de 55 centimètres environ.



Colis de stockage de déchets C (type R7/T7)

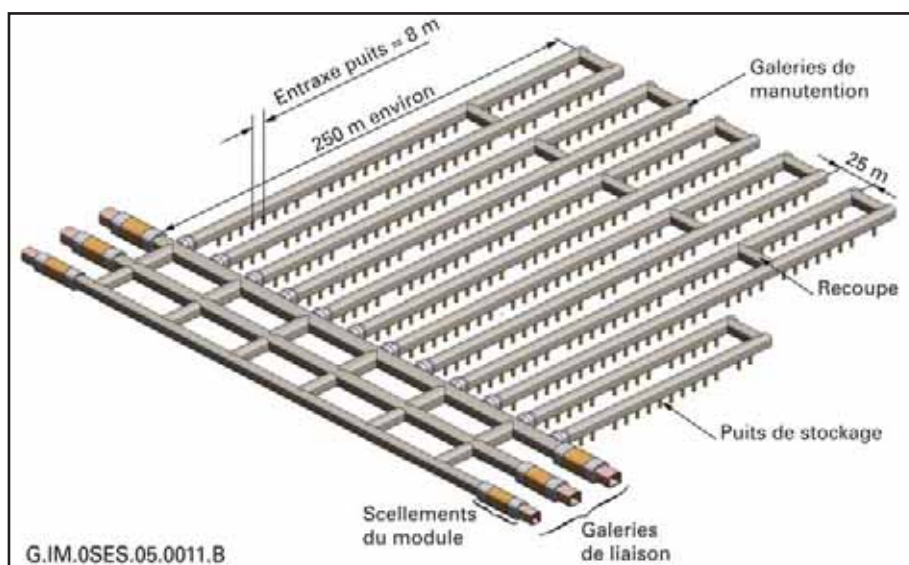
Plusieurs techniques sont envisageables pour la fabrication du corps en acier. Toutes sont éprouvées au plan industriel, pour des dimensions et des épaisseurs d'acier au moins égales à celles du surconteneur. Après introduction du colis primaire dans le corps, le couvercle est soudé sur ce dernier par la méthode classique du faisceau d'électrons qui assure une soudure de pleine épaisseur et affecte peu les propriétés du matériau vis-à-vis des phénomènes de corrosion.

2.2.2 L'architecture de la zone de stockage de déchets C

Dans l'architecture proposée, la zone de stockage de déchets C est fractionnée en plusieurs modules composés de galeries de manutention parallèles le long desquelles sont distribués les puits de stockage.

Dans chaque module, l'espacement entre galeries de manutention est de 25 mètres pour éviter les interactions mécaniques. La distance entre puits de stockage est fixée à partir de critères thermiques, notamment une température maximum de 90°C au point le plus chaud des barrières ouvragées. Pour un granite aux propriétés thermiques moyennes dans le contexte français, l'espacement des puits de stockage serait d'environ 8 mètres. Cette configuration induit, au bout d'une vingtaine d'années de stockage, une température maximum de 55°C environ dans la roche en paroi des puits pour une température naturelle de la roche de 25°C.

Les galeries de manutention ont une largeur et une hauteur (5 à 6 mètres) permettant le transfert, la mise en place et l'éventuel retrait des colis dans les puis de stockage. Des recoupes joignent les galeries deux par deux pour répondre aux exigences de sécurité opérationnelle. Elles débouchent sur un faisceau de trois galeries assurant les transferts des flux entre les modules et les ouvrages d'accès.



Architecture type d'un module de stockage de déchets C

Les modules de stockage sont implantés dans le granite à l'écart des failles (en général pluri-hectométriques voire plus grandes) qui seraient trop fortement conductrices d'eau pour pouvoir être recoupées par les galeries desservant le module. La géométrie de cette fracturation permet d'envisager des longueurs de galeries de manutention d'environ 200 à 250 mètres.

Pour stocker l'inventaire des déchets retenu pour l'étude selon les scénarios de production (scénario avec retraitement complet S1a ou scénario avec arrêt du retraitement S2), de 15 à 40 modules sont nécessaires, chaque module contenant entre 450 et 600 alvéoles de stockage. Comme pour les déchets B, une architecture sur deux niveaux réduit l'emprise du stockage et facilite la reconnaissance et la caractérisation du granite.

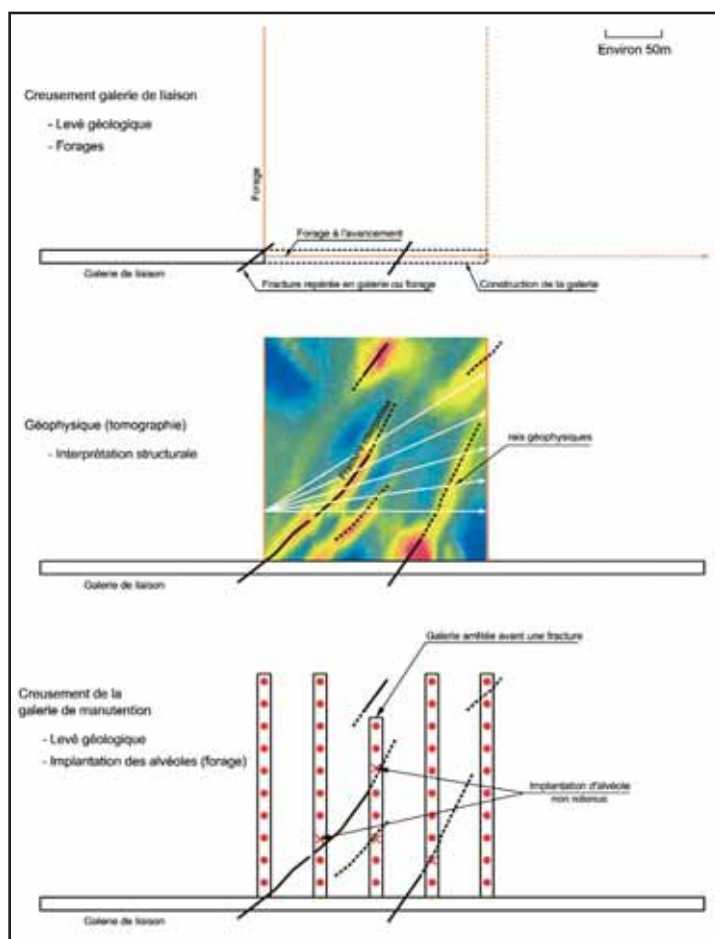
L'implantation des modules dans des blocs de granite à l'écart de failles conductrices d'eau n'exclut pas la présence d'une petite fracturation de la roche à l'intérieur du module. Cependant, elle doit être de conductivité hydraulique suffisamment faible pour ne pas remettre en cause les fonctions de confinement des différents composants du stockage. La reconnaissance du granite prévue avant stockage des colis a pour but de vérifier l'adéquation de l'implantation des alvéoles à la fracturation. Il peut être ainsi décidé de ne pas implanter un certain nombre des puits de stockage, là où la petite fracturation aurait une disposition et une conductivité hydraulique n'assurant pas la robustesse exigée vis-à-vis de la sûreté à long terme.

Reconnaissance « à l'avancement » d'un granite pour l'implantation de puits de stockage d'un module de déchets C ou de combustibles usés

Pendant la phase de construction d'un stockage, des travaux de reconnaissance géologique ont pour objectif de préciser l'implantation des puits de stockage et d'en vérifier l'adéquation à la fracturation du granite.

Dans un premier temps, et à partir d'une galerie du stockage, des forages sont réalisés dans l'axe d'une partie des futures galeries de manutention le long desquelles seront distribués les puits de stockage, par exemple une sur cinq ou une sur dix. Entre ces forages, des mesures géophysiques (par exemple tomographie sismique) identifient les traces d'éventuelles fractures dans la roche granitique. Un schéma de fracturation est alors établi à partir des données géophysiques, des levés géologiques et des mesures hydrogéologiques effectuées en forage. Au vu du schéma établi, de nouveaux forages sont réalisés dans l'axe de chacune des futures galeries de manutention. Ils incluent la réalisation de mesures testant la conductivité hydraulique des éventuelles fractures. Ces données conduisent à la décision d'excaver (ou non) les galeries de manutention.

Dans un deuxième temps, dans les galeries de manutention, un levé géologique est effectué le long des parois pour vérifier la justesse du schéma de fracturation. Les lieux prévisionnels d'implantation des puits sont testés par des forages verticaux d'une longueur équivalente à celle projetée pour les puits de stockage. Des tests de débits d'eau et le levé géologique de la petite fracturation sont alors effectués pour s'assurer de la bonne implantation des puits, c'est-à-dire de leur adéquation avec des critères établis tout au long des phases d'études préalables à la construction du stockage. Si cette adéquation n'était pas vérifiée avec suffisamment de confiance, l'implantation serait rejetée. Un taux de rejet de 10 % a été pris en hypothèse dans les études SKB du concept de stockage KBS-3 (Suède) de combustibles usés. Après excavation des puits de stockage, une dernière vérification est faite à partir de levés géologiques et de mesures d'éventuels débits d'eau dans les puits de stockage pour en garantir l'implantation.



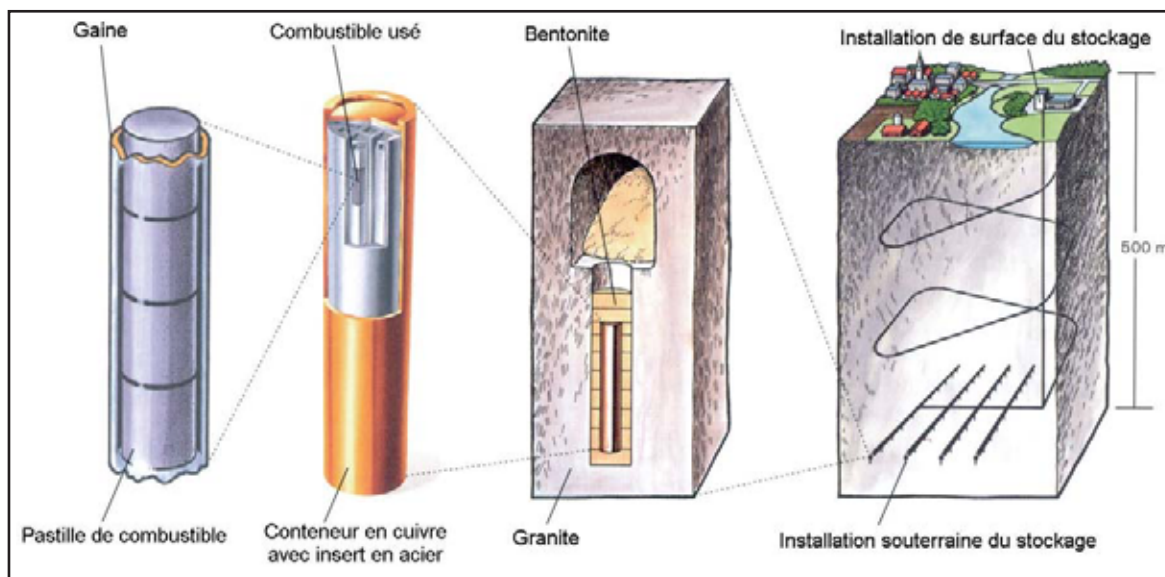
Principe de caractérisation de la fracturation à l'avancement

2.3 Le stockage des combustibles usés

L'architecture proposée pour le stockage des combustibles usés repose sur les mêmes principes que celle du stockage des déchets C. En effet, l'exothermicité des colis conduit à gérer l'emprise de la zone de stockage sur un même schéma de modules implantés à l'écart de failles conductrices d'eau. Des puits de stockage sont distribués le long de galeries manutention parallèles et distantes d'environ 25 mètres. La distance entre puits de stockage serait de 10 à 15 m.

Cependant, à la différence des déchets C, les combustibles usés ne sont pas confinés dans une matrice vitreuse : les assemblages sont donc susceptibles de relâcher des radioéléments plus rapidement en cas d'arrivée d'eau liée à la proximité de failles éventuelles. En effet, compte tenu de l'emprise nécessaire pour le stockage des combustibles usés (plusieurs km²), la présence de failles peu conductrices d'eau au voisinage des alvéoles ne peut être exclue, même si la localisation des alvéoles les évite comme pour les déchets C. Il faut donc concevoir des colis de stockage protégeant sur des durées suffisamment longues, les assemblages de l'arrivée de l'eau, notamment pour faire face à l'éventualité d'une défaillance des dispositifs de scellement des galeries.

Dans le contexte d'une étude sans site spécifique, l'Andra s'est appuyée sur les acquis du concept « KBS-3 » avec conteneur en cuivre durablement étanche retenu dès les années 80 par la Suède et référence commune de SKB (Suède) et Posiva (Finlande) pour les études de stockage en milieu granitique. Le cuivre est un métal thermodynamiquement stable dans des conditions d'environnement chimique compatibles avec celles régnant en profondeur dans un granite. Le stockage est conçu pour que ces conditions se maintiennent à l'échelle des temps considérés par les analyses de sûreté, c'est-à-dire plusieurs centaines de milliers d'années.



Le concept suédois KBS-3 de combustibles usés (données SKB)

Des expériences au laboratoire d'Äspö testent en vraie grandeur les principaux éléments de ce concept.

Les exigences sur la durabilité du conteneur pourraient être moindres pour certains sites granitiques du fait de leur disposition géologique. L'organisme espagnol Enresa étudie la possibilité d'un stockage de combustibles usés avec la conception de conteneurs en acier durables à l'échelle de quelques milliers d'années.

2.3.1 L'alvéole de stockage de combustibles usés : petits puits avec conteneur en cuivre et barrière ouvragée argileuse (concept « KBS-3 »)

Dans le concept KBS-3 suédois, l'alvéole de stockage est un petit puits vertical contenant un conteneur en cuivre de combustibles usés.

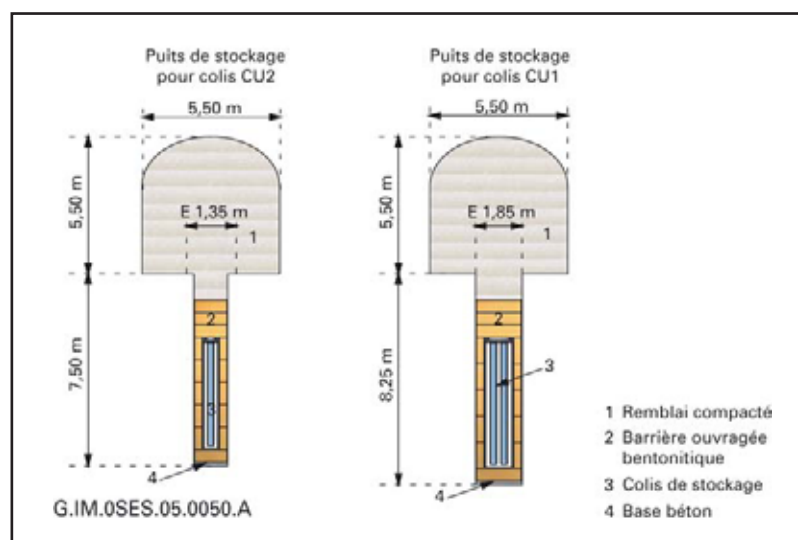
Depuis quelques années, SKB et Posiva étudient aussi la possibilité d'un stockage en tunnels horizontaux qui limitent le volume de roche à excaver. L'Andra assure une veille sur ces études ; cependant les nombreux résultats déjà obtenus sur le concept KBS-3 vertical conduisent à proposer, à ce stade, le puits vertical de

stockage comme l'option de référence. Par ailleurs, comme pour les déchets C, l'adaptation de l'implantation d'une alvéole verticale à la petite fracturation du granite est plus simple dans le cas d'une disposition plutôt verticale de la fracturation, ce qui est le plus souvent constaté dans le contexte géologique français.

• **Le puits de stockage**

La conception du puits de stockage évite l'emploi de composants, notamment métalliques, susceptibles d'interagir chimiquement avec le conteneur en cuivre et de mettre en cause sa fonction d'étanchéité sur de longues durées. Comme pour les déchets C, la barrière ouvragée en argile gonflante assure un régime de transfert par diffusion dans les puits de stockage même en cas de petites fractures en paroi des puits. Elle contribue à maintenir des conditions d'environnement chimique compatibles avec le cuivre du conteneur en assurant un tampon chimique avec les eaux venant du granite et des galeries de manutention. Les anneaux de bentonite autour des conteneurs ont environ 35 centimètres d'épaisseur.

Les dimensions réduites du puits de stockage (environ 8 m de long et moins de 2 m de diamètre) permettent son excavation, comme pour les déchets C, avec une machine de foration limitant fortement l'endommagement la roche en paroi. Les puits de stockage sont borgnes, ils débouchent vers le haut sur une galerie de manutention permettant le transfert et la mise en place des conteneurs de combustibles usés.



Alvéoles de stockage de combustibles usés

• **Le conteneur de combustibles usés : études SKB et transposition aux combustibles usés français**

Le conteneur de combustibles usés conçu par SKB comprend une enveloppe cylindrique en cuivre et une structure interne en fonte résistant mécaniquement (appelée « insert »).



Vue de l'enveloppe en cuivre et d'un insert pour des assemblages BWR (source SKB)

Descriptif de concepts de stockage en milieu granitique

L'enveloppe en cuivre comprend un corps cylindrique sur lequel sont soudés un fond et un couvercle. Son épaisseur (50 mm) permet au conteneur de résister à une pression hydrostatique supérieure à 5 MPa et à une pression de gonflement de la barrière ouvragée de l'ordre de 7 MPa. La tenue mécanique du colis est assurée par la déformation de l'enveloppe, qui s'appuie sur un insert interne rigide, sans que son intégrité soit affectée. La faisabilité de la fabrication de tubes de 50 mm d'épaisseur a été démontrée par SKB pour différents procédés de l'industrie métallurgique : fabrication par extrusion, par perçage et étirage ou par forgeage.

L'insert en fonte est dimensionné pour assurer, outre la résistance mécanique du conteneur, la non-criticité du système. Il est conçu en Suède pour recevoir 12 assemblages de combustibles usés du type BWR ou 4 assemblages de combustibles du type PWR (analogues aux combustibles français REP). Ce nombre est compatible avec un critère de température maximum de 90°C en surface des colis dans les puits de stockage après leur mise en place.

La transposition aux combustibles usés français conduit à la conception d'insert ayant des logements pour quatre assemblages UOX (CU1) ou un seul assemblage MOX (CU2). L'épaisseur de la fonte entre logements est dimensionnée pour faire face à tout risque de criticité.

Le diamètre du conteneur est de 1,15 m pour les CU1 et de 0,65 m pour les CU2. Sa longueur dépend aussi du type de combustibles : 4,50 m ou 5,25 m.

Le soudage du couvercle après mise en place des assemblages de combustibles usés a été largement étudié par SKB. Différentes techniques ont été testées : par faisceau d'électrons et par friction. Les tests montrent qu'elles sont compatibles avec une mise en œuvre industrielle en contexte nucléaire.

3 L'exploitation réversible du stockage

L'exploitation réversible d'un éventuel stockage peut être définie comme la possibilité d'un pilotage progressif et flexible du stockage qui laisse aux générations futures une *liberté de décision*. Dans cette optique, le processus de stockage peut être décomposé en une *succession d'étapes* qui ménage, de la réalisation des premiers modules jusqu'à la fermeture éventuelle d'un module ou d'une zone de stockage, la possibilité *d'un temps d'attente et d'observation, avant de décider* de passer à l'étape suivante ou de revenir en arrière. Le franchissement d'une étape n'est pas un choix définitif, telle la page que l'on tournerait, mais un choix raisonné, fait en toute connaissance des paramètres scientifiques, techniques, économiques, sociaux et environnementaux et des conséquences induites par le passage d'une étape à l'autre.

La réversibilité renvoie ainsi à la recherche d'une approche flexible et adaptable dans le temps et peut être appréhendée en terme de *niveaux*. Pour proposer une telle approche, les études et recherches de l'Andra ont consisté à :

- analyser les principales phases de la vie d'un stockage et les échelles de temps associées, afin de déterminer les étapes clés qui nécessitent une intervention humaine,
- imaginer une gestion du stockage par étapes, avec des jalons décisionnels. Le passage d'une étape à l'autre permettrait de rendre le stockage de plus en plus passif, tout en ne diminuant que graduellement le niveau de réversibilité et, en conséquence, les charges de surveillance et de maintenance.

L'Andra a pris ces objectifs en compte dans les options de conception d'un stockage proposées, au travers notamment d'une architecture modulaire, d'une recherche de simplification des opérations menées au fond, des dimensionnements, de choix de matériaux durables. La réversibilité ne correspond, pour autant, à aucun compromis vis-à-vis des objectifs de sûreté : aucune disposition technique pouvant perturber significativement une fonction de sûreté n'est incluse dans un objectif de réversibilité.

La réversibilité est aussi rendue possible par la connaissance de l'évolution de l'état des ouvrages et la définition de moyens d'actions, sur une échelle de temps au moins séculaire : cela a conduit à étudier des dispositions opérationnelles pour la gestion du stockage, notamment la reprise des colis, ainsi que des moyens d'observation qui pourraient être implantés dans les ouvrages.

Une exploitation progressive et sur une longue durée

La mise en service industriel d'un stockage démarre avec la réception des premiers colis sur le site et leur mise en stockage dans les premiers ouvrages construits. Avec des hypothèses techniques raisonnables quant au rythme d'accueil des colis, l'exploitation du stockage pourrait s'étaler sur des durées de plusieurs décennies à un siècle. Ainsi, la mise en stockage progressive et sur une longue durée offre une souplesse dans la gestion du développement d'un stockage et permet de tirer parti de l'expérience acquise. Elle permet une prise de décisions par étapes successives et constitue un élément favorable à la réversibilité.

3.1 Les activités mises en œuvre dans les installations de stockage

3.1.1 Les activités

Les activités mises en œuvre pour le stockage portent sur la construction des ouvrages, l'exploitation nucléaire, la fermeture d'ouvrages.

Compte tenu de la durée globale de ces phases et de la volonté de proposer un schéma flexible pour l'exploitation d'un stockage, ces différentes activités peuvent être simultanées. A ces activités principales s'ajoutent des domaines connexes tels que la maintenance, la surveillance et l'observation en appui à la gestion réversible du stockage.

- **La construction progressive**

Après une phase de construction initiale, *c'est-à-dire la construction des ouvrages et équipements requis pour stocker le premier colis de déchets* (installations de surface, ouvrages de liaison surface-fond, premier module de stockage de colis et galeries d'accès à celui-ci), les travaux de construction peuvent s'organiser de manière flexible : alvéoles de stockage, modules et galeries peuvent être aménagées au fur et à mesure des besoins, c'est-à-dire au rythme d'exploitation souhaité. Des travaux de *reconnaissance « à l'avancement »* du granite accompagnent les phases de construction.

- **L'exploitation nucléaire**

Elle conjugue les travaux d'exploitation nucléaire dans les installations de surface (réception et conditionnement des déchets en colis de stockage) et dans les installations souterraines (transfert des colis dans les installations souterraines, mise en place dans les alvéoles de stockage et, le cas échéant, retrait).

L'exploitation nucléaire se caractérise par des contraintes similaires à celles des installations nucléaires classiques (équipements spécifiques de radioprotection, zonage selon le niveau de risque de contamination et d'exposition, etc.). Les colis primaires de déchets livrés sur le site de stockage sont extraits de leurs emballages de transport, puis placés en colis de stockage dans les installations de surface. Chaque colis de stockage est ensuite transféré dans une hotte assurant la protection radiologique du personnel, depuis ce bâtiment jusqu'aux installations souterraines via le puits de transfert des colis. Au fond, la hotte est accostée à la tête d'alvéole : à l'aide d'un équipement téléopéré, le colis de stockage est extrait de la hotte et mis à sa place définitive dans l'alvéole.

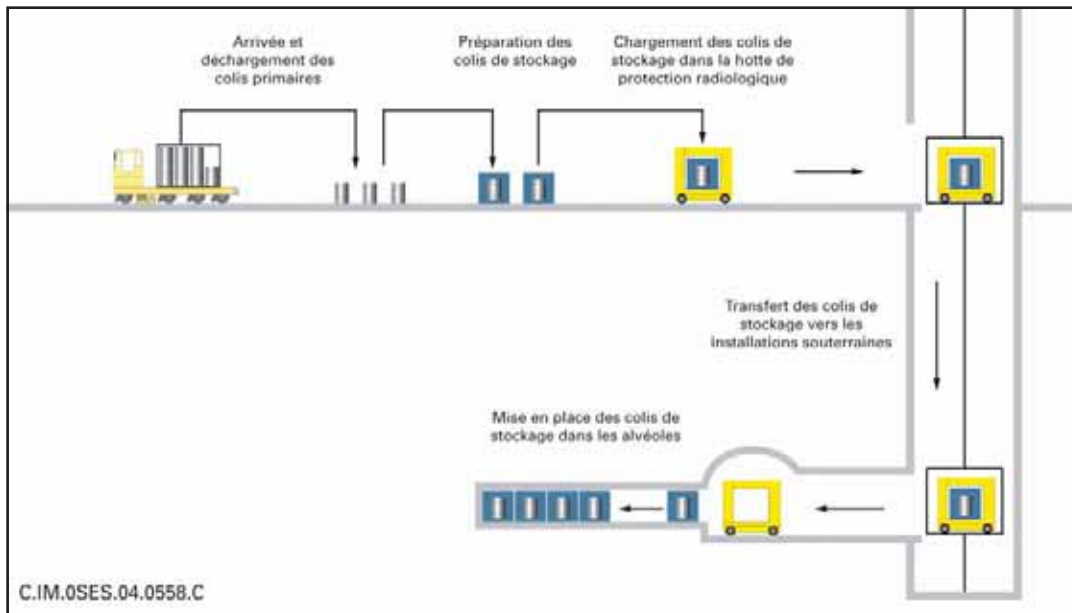


Schéma de principe de l'exploitation nucléaire du stockage

• La fermeture des ouvrages

A la différence d'un entreposage, un stockage réversible peut être rendu passif, c'est-à-dire constituer un système robuste et sûr à long terme ne nécessitant pas d'intervention humaine après sa fermeture.

La fermeture consiste ainsi, dans le cadre d'un processus par étapes successives souscrivant à l'exigence de réversibilité, à mettre en place les différents scelllements (bouchon d'argile gonflante au niveau des alvéoles et des galeries) et à remblayer les galeries.

• Les activités connexes : surveillance, maintenance, observation

La *surveillance* vise à garantir la sûreté opérationnelle, en particulier pour la protection des personnes (conditions de travail) et de l'environnement durant l'exploitation. Au-delà des mesures de surveillance, l'*observation* a pour objectif de suivre le comportement du stockage, en appréhendant les phénomènes et en suivant leur évolution, afin de fournir des éléments scientifiques et techniques pour fonder la gestion réversible du stockage et aider à la prise de décision. Surveillance et observation sont étroitement liées et renvoient à une même motivation : augmenter la confiance dans le processus de stockage et sa maîtrise.

• La maintenance des ouvrages souterrains

En lien avec la surveillance et l'observation, elle permet de garantir le maintien des fonctions allouées aux ouvrages pendant toute l'exploitation du stockage, c'est-à-dire jusqu'aux étapes de fermeture. Cette activité mobilise des techniques courantes de génie civil, en particulier pour assurer un accès aux ouvrages souterrains. Elle veille au bon fonctionnement des équipements pour la mise en place ou le retrait éventuel des colis en toute sécurité.

La gestion de la co-activité dans les installations souterraines

La gestion de la coexistence d'activités nucléaires et non nucléaires (co-activité) et la conception des galeries d'accès sont fondées sur deux principes essentiels :

- *la séparation des activités* d'exploitation nucléaire, caractérisées par des risques et des contraintes particuliers (radioprotection, sûreté du transport,...), des activités de construction/fermeture, pour éviter toute interférence opérationnelle. Ce principe de séparation conduit à adopter deux circuits dédiés : l'un aux activités d'exploitation nucléaire, notamment transport des hottes contenant les colis, et qui s'organise autour du puits de descente des colis et des galeries de transfert des colis (exploitation nucléaire), l'autre aux activités de construction/fermeture et qui s'organise autour du puits de service et des galeries de travaux,
- *la progressivité de la construction et de l'exploitation* qui offre une flexibilité de gestion (notamment la possibilité de faire évoluer la conception ou le mode de gestion du stockage en intégrant le retour d'expérience).

3.1.2 Une exploitation réversible

L'approche de la réversibilité proposée par l'Andra dépasse la seule possibilité technologique de retirer les colis et peut être définie comme la *possibilité d'un pilotage progressif et flexible du stockage*. L'objectif est de pouvoir intégrer le retour d'expérience et les progrès techniques dans la gestion du stockage et, plus généralement, de laisser aux générations futures une liberté de décision pour la gestion des déchets radioactifs.

• Un processus par étapes

L'Andra a retenu de ne pas fixer a priori de durée à la réversibilité, mais plutôt de raisonner en niveaux de réversibilité. Il s'agit d'offrir une souplesse aussi grande que possible dans la gestion de chaque étape, ménageant notamment la possibilité d'un maintien en l'état avant de décider de passer à l'étape suivante ou de revenir en arrière.

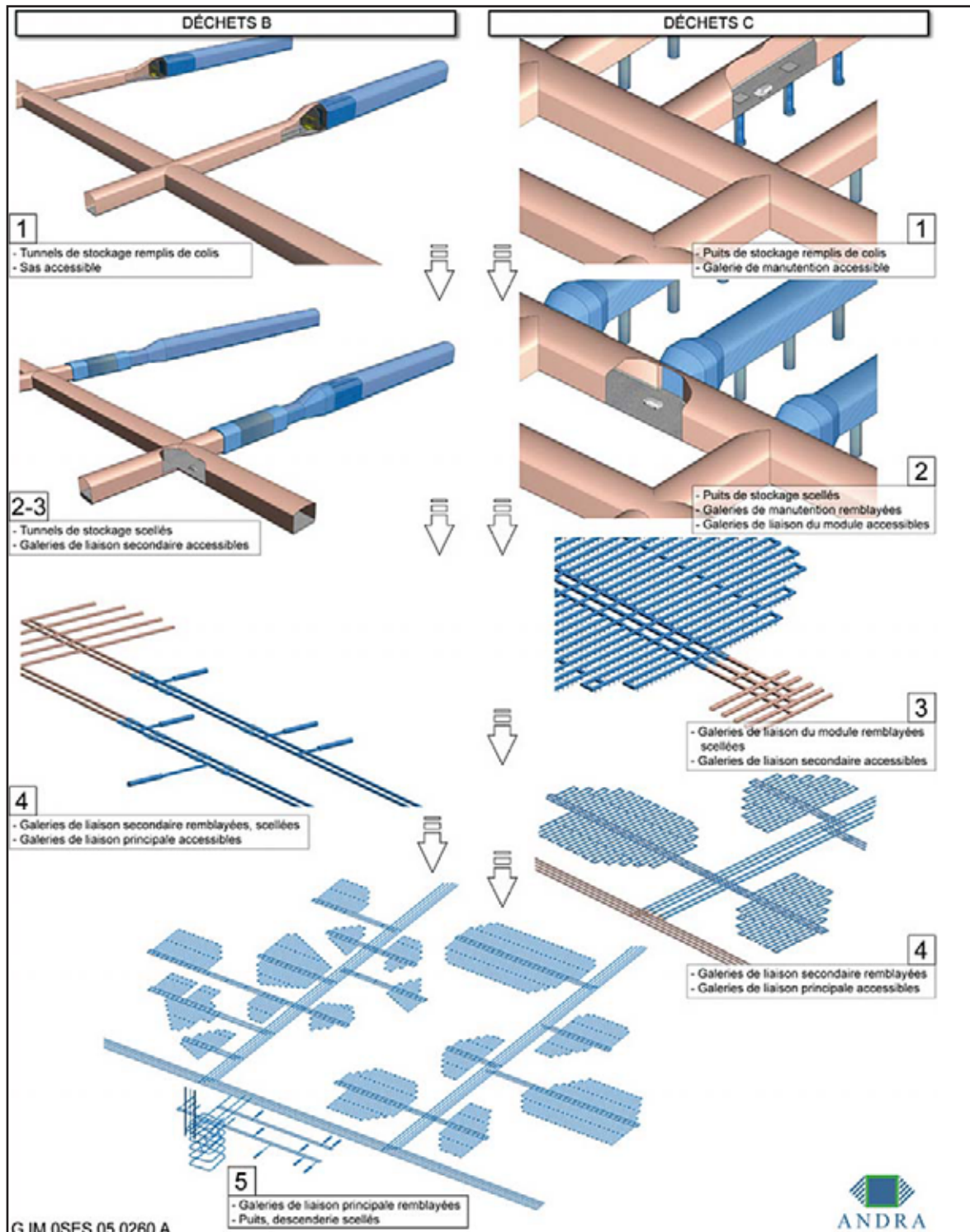
Le processus de stockage est ainsi conçu comme une succession d'étapes à franchir dont la durée n'est pas fixée a priori. Le passage d'une étape à l'autre n'est pas définitif, ni imposé par un schéma d'exploitation fixé a priori. Au contraire, à chaque étape sont associés des choix : retour en arrière, maintien en l'état, passage vers une réversibilité moindre. La conception du stockage (architecture modulaire, recherche de simplification de l'exploitation, dimensionnement et choix de matériaux durables, etc.) vise à les laisser les plus ouverts possibles.

• Les étapes du processus de stockage

Plusieurs étapes peuvent être identifiées dans le processus de stockage et sa fermeture progressive vers une installation sûre à long terme et passive.

- « *Après mise en place des colis* » : les alvéoles sont remplies de colis et non scellées. Des dispositifs en tête d'alvéole protègent les personnels présents dans les galeries d'accès aux alvéoles. Les galeries sont ventilées et l'ensemble des infrastructures souterraines est accessible. *Cette étape est comparable à une configuration d'entreposage.*
- « *Après scellement de l'alvéole* » : cette étape débute après la fermeture des alvéoles par un bouchon d'argile gonflante. Les galeries d'accès aux alvéoles sont ventilées et les têtes d'alvéoles scellées sont accessibles.
- « *Après fermeture d'un module* » : cette étape débute à l'issue du scellement et du remblayage de toutes les composantes d'un module. La fermeture du module comprend le remblayage des galeries d'accès internes au module. Les galeries de liaison desservant le module restent ventilées et accessibles.
- « *Après fermeture d'une zone de stockage* » : cette étape débute après remblayage et scellement des galeries de liaison internes à une zone de stockage. Les galeries de liaison principales donnant accès à la zone de stockage restent ventilées et accessibles.
- « *Post-fermeture* » : cette étape débute après le scellement et le remblayage des puits et correspond à la fin du processus de stockage. Celui-ci se trouve alors en configuration de « post-fermeture ». Une période d'observation du stockage fermé et de son environnement peut être envisagée. *L'installation est rendue complètement passive, c'est-à-dire qu'elle assure la protection de l'homme et de l'environnement sans aucune intervention humaine.*

L'ensemble de ce processus pourrait se dérouler sur une durée pouvant aller de plusieurs décennies à plusieurs siècles si on le souhaite. La progressivité de la fermeture offre la possibilité de mettre en œuvre un processus décisionnel organisé en plusieurs étapes et maintient à tout moment la possibilité d'un retour à l'étape précédente. Le schéma progressif esquissé ci-dessus ne constitue nullement le seul schéma envisageable ; un plus grand nombre d'étapes ou des durées différentes pourraient être considérées. La conception modulaire proposée pour le stockage et la flexibilité offerte dans son mode d'exploitation permettraient en effet d'adapter le schéma en prenant en compte la connaissance de l'état du stockage apportée par l'observation.



Etapes d'exploitation et fermeture d'un stockage

• Un programme d'observation *in situ* pour aider à la gestion réversible du stockage

Les choix de gestion du stockage s'appuient sur la compréhension de son évolution sur plusieurs siècles : l'intégration de moyens d'observation a pour objectif d'aider au pilotage du processus réversible de stockage.

Il s'agit de suivre l'évolution des différents ouvrages et de leur environnement, afin de s'assurer de leur durabilité et de détecter, le cas échéant, une nécessité d'action (maintenance par exemple) pour préserver les différents choix de gestion : maintien d'un ouvrage en l'état pendant une certaine durée, passage à l'étape suivante en scellant l'ouvrage, retour à l'étape précédente en rétablissant l'accès à celui-ci. Cela permet aussi de tirer le retour d'expérience afin d'améliorer la conception et la gestion du stockage.

L'observation apporte aussi des informations pour apprécier les conditions d'une éventuelle récupération des colis. Plus généralement, l'observation permet de vérifier que le fonctionnement demeure conforme aux prévisions et d'améliorer les modèles de comportement du stockage sur la base des données acquises.

Des moyens d'observation et de mesure (des déformations, de la température, de la pression interstitielle...) ainsi que des réseaux de transmission de données sont placés *dans quelques alvéoles témoins B, C et CU, dans les ouvrages d'accès (puits ou descenderies) et des galeries*, dès leur construction, pour observer leur évolution durant l'exploitation, avant et après scellement des ouvrages. D'autres alvéoles, en plus grand nombre, peuvent aussi faire l'objet d'une instrumentation plus légère, pour confirmer le comportement observé sur les alvéoles témoins et pour transposer les résultats à l'ensemble de la zone de stockage concernée.

Les paramètres à observer au cours des différentes étapes du processus de stockage sont ceux qui permettent de suivre l'évolution des ouvrages, d'en évaluer régulièrement la stabilité et de quantifier les différents phénomènes auxquels est subordonnée un éventuel retour en arrière :

- *pour les alvéoles B*, ce sont les cinétiques d'arrivée d'eau, la production de gaz par certains déchets et la température pour les alvéoles B contenant des déchets faiblement exothermiques,
- *pour les alvéoles de stockage de déchets C (ou de combustibles usés)*, l'observation concerne le champ thermique dans et autour de l'alvéole, le comportement mécanique des barrières ouvragées argileuses gonflantes ainsi que la montée des charges hydrauliques dans le granite environnant,
- *dans le cas des ouvrages d'accès (puits et galeries)*, l'observation vise à suivre la saturation des remblais et des scelllements ainsi que la montée des charges hydrauliques dans le granite environnant.

Les « règles de l'art » développées à partir du retour d'expérience de l'auscultation de nombreux ouvrages de génie civil et des expériences les plus longues en laboratoires souterrains étrangers suggèrent un ensemble de bonnes pratiques :

- redondance des moyens, par recours à des technologies différentes ou multiplication d'un même instrument, pour vérifier la cohérence des mesures et limiter la perte d'information en cas de défaillance d'un instrument,
- choix d'outils de qualité et pertinents par rapport à l'amplitude à mesurer et à la précision attendue,
- répartition judicieuse des moyens d'observation, en particulier à l'aide de modélisations préliminaires,
- intégration des moyens d'observation dès la phase de conception des ouvrages.

Des moyens d'auscultation adaptés au stockage

Plusieurs technologies de mesures sont mises en œuvre dans les ouvrages de génie civil et les laboratoires souterrains :

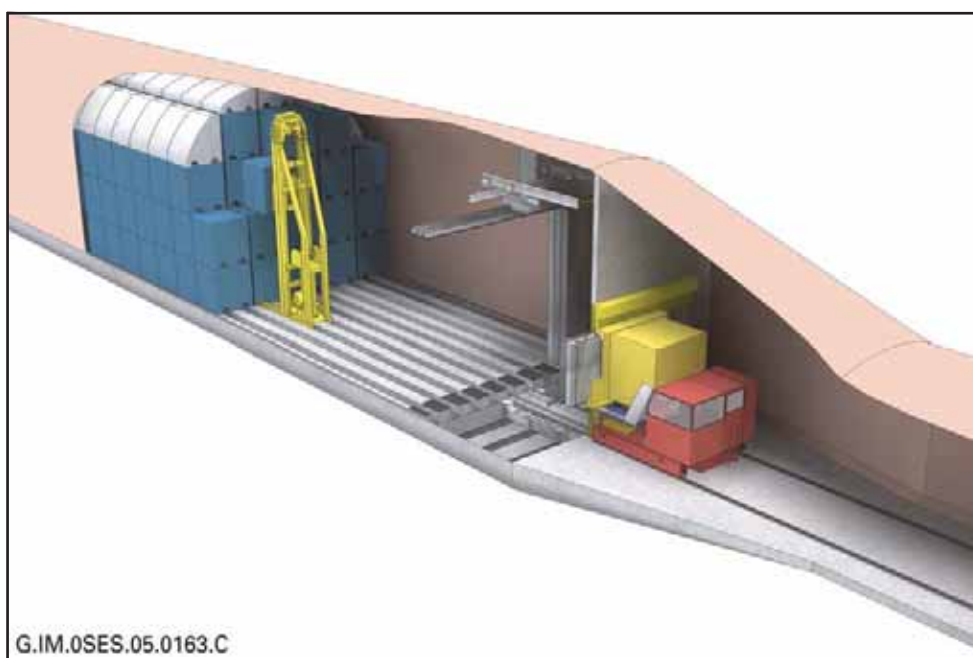
- *Température* : capteurs à corde vibrante (mesure ponctuelle), fibres optiques (mesure sur des profils longs),
- *Déformations, déplacements et contraintes mécaniques* : extensomètres à corde vibrante (mesures de déformations locales) et à base longue pour les forages ou remblais (déformations sur plus grandes distances), pendules verticaux (suivi du déplacement d'un ouvrage sur trois axes),
- *Pression de l'eau et débits* : cellules de pression interstitielle à corde vibrante,
- *Humidité relative des barrières ouvragées, des remblais et des scelllements* : hygromètres à condensation.
- *Concentration en gaz toxiques, corrosion, contamination* : détecteur d'hydrogène, inspection visuelle, prélèvements, mesures par ultrasons et témoins pour la corrosion, spectrométrie de masse pour la contamination radioactive,
- *Moyens de transmission et centralisation* : câbles électriques et, surtout, capteurs à fibres optiques et transmission électromagnétique (sans fil) à basse ou très basse fréquence.

3.2 La fermeture réversible des ouvrages souterrains : les niveaux de réversibilité

La fermeture par étapes des ouvrages souterrains entraîne le passage d'un niveau de réversibilité à un niveau moindre. Les étapes du processus sont similaires pour tous les colis. Toutefois, des différences peuvent exister. Elles tiennent à la fois aux architectures des différentes zones de stockage et aux propriétés de leurs composants ouvrages : scellements, remblais, barrières ouvragées, colis de stockage...

3.2.1 Les ouvrages de déchets B

Tant que les tunnels ne sont pas fermés par un scellement, la réversibilité du stockage des déchets B est totale. Le retrait des colis peut se faire avec les mêmes moyens que ceux de leur mise en place : un chariot élévateur téléopéré. La maintenance et la surveillance liées à l'exploitation peuvent être poursuivies aussi longtemps que l'on souhaite maintenir les tunnels ouverts.



Stockage de déchets B : mise en place et éventuel retrait de colis

Après fermeture des tunnels, les installations de la tête de tunnel sont démontées, un scellement est posé dans la galerie d'accès et la ventilation est arrêtée. L'évacuation de l'eau provenant éventuellement des petites fractures du granite en paroi des tunnels est stoppée. L'arrêt de la ventilation peut entraîner l'accumulation de gaz émis par les colis. De l'eau peut aussi s'accumuler sur le plancher des tunnels.

Dans ces conditions, le retrait des colis nécessiterait des interventions préalables, notamment :

- forages au travers du scellement pour évacuer les gaz qui se seraient accumulés dans les tunnels, voire l'eau en plancher,
- rétablissement de la ventilation,
- démantèlement du scellement,
- rééquipement de la tête d'alvéole.

Après reconstruction du sas et réinstallation de la ventilation dans la chambre de stockage, la reprise des colis pourrait se faire avec les mêmes moyens que ceux de leur mise en place. En effet, la durabilité du béton des colis assure leur intégrité pendant plusieurs siècles.

Par ailleurs, le scellement d'un tunnel ne modifie pas la possibilité d'exploiter d'autres tunnels, ce qui assure de la souplesse dans la gestion du stockage.

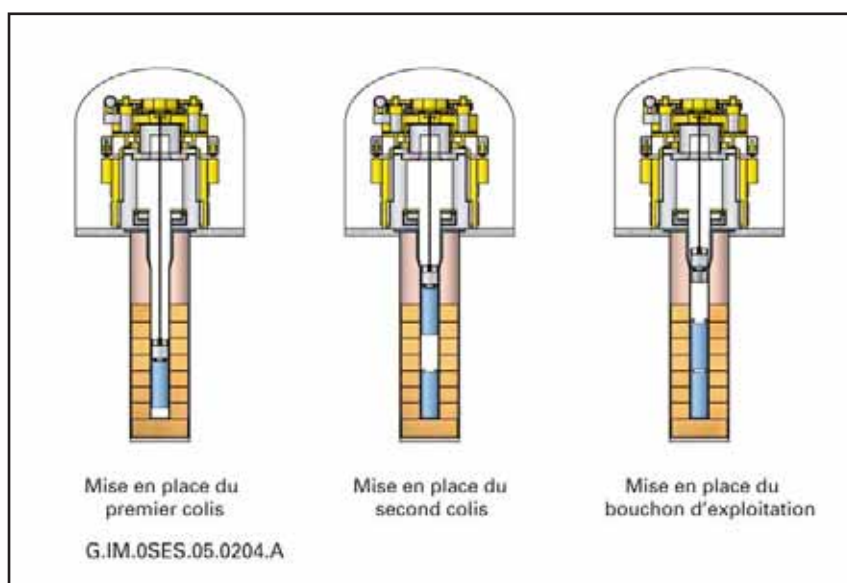
Dans les étapes suivantes, la fermeture progressive des galeries d'accès aux tunnels de stockage, leur remblayage et leur scellement réduisent l'accessibilité aux colis. Le démantèlement des scellements et des remblais nécessiterait de réinstaller des moyens de ventilation et d'exhaure de l'eau, ce qui relève de techniques minières classiques et éprouvées en milieu granitique.

3.2.2 Les ouvrages de déchets C

Comme pour les déchets B, la réversibilité du stockage des déchets C est totale tant que les puits de stockage ne sont pas scellés et les galeries de manutention non remblayées. Elle nécessite de maintenir la ventilation et le drainage dans les galeries de manutention.

L'éventuel retrait des colis se ferait avec les mêmes moyens que ceux de leur mise en place, c'est-à-dire selon un mode de manutention verticale téléopérée similaire à celui utilisé depuis des années sur le site de COGEMA - La Hague.

Le chemisage en acier permet de mettre en place et éventuellement de retirer une ou plusieurs étapes selon le nombre de colis par puits. Le bouchon d'exploitation assure une fonction de radioprotection. La barrière ouvragée en argile gonflante et le chemisage protègent les colis de l'eau qui pourrait éventuellement provenir des petites fractures du granite en paroi des puits de stockage. Tant que la corrosion n'a pas affaibli la résistance mécanique du chemisage (durée de quelques siècles), les colis de stockage restent libres dans le chemisage.



Stockage de déchets C : mise en place et éventuel retrait de colis en puits

Le scellement des puits de stockage par un bouchon de bentonite ainsi que le remblayage et la fermeture des galeries de manutention réduisent l'accessibilité aux colis et le niveau de réversibilité. Le retrait des colis nécessite d'accéder aux puits de stockage, donc de déblayer les remblais. Ensuite, le bouchon de bentonite et le bouchon d'exploitation sont déposés.

La fermeture du module de stockage s'accompagne aussi du remblayage des galeries de manutention et des galeries de liaison ainsi que de la pose de scellement en des points clés des galeries de liaison. La ventilation est arrêtée et le pompage de l'eau susceptible de provenir des petites fractures en paroi des galeries est stoppé. Un nouvel accès aux galeries de manutention impliquerait, comme pour les déchets B, de réinstaller des moyens de ventilation, démanteler les scellements et déblayer les remblais.

3.2.3 Les ouvrages de combustibles usés

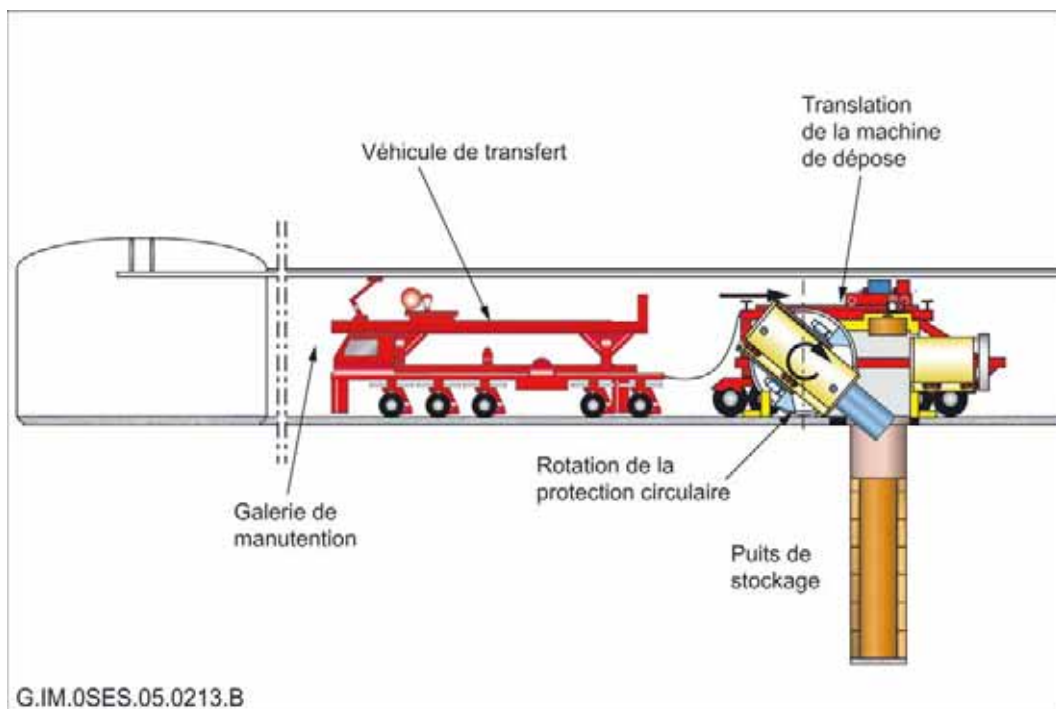
Les étapes du processus d'un éventuel stockage de combustibles usés sont similaires à celles d'un stockage de déchets C. Cependant, l'option proposée d'un conteneur en cuivre pour le stockage des combustibles usés (concept KBS-3) entraîne des dispositions spécifiques vis-à-vis de la réversibilité. En effet, l'utilisation du cuivre

conduit à ne pas utiliser des composants en acier dans les puits de stockage pour prévenir toute interaction chimique susceptible d'altérer le conteneur. On ne peut donc pas utiliser de chemisage qui faciliterait le retrait des colis. De même, pour prévenir une éventuelle oxydation du cuivre qui pourrait être liée au maintien de la ventilation des galeries de manutention, on peut être conduit à fermer le puits de stockage peu après la mise en place du conteneur.

Dans ces conditions, il est choisi de ne stocker qu'un seul colis par puits, ce qui assure de la souplesse à la gestion du processus de stockage et à l'organisation du retrait éventuel des colis.

Des techniques de manutention du colis ont fait l'objet de démonstration *in situ* dans le laboratoire d'Äspö en Suède. SKB teste également dans le laboratoire d'Äspö la dépose d'un bouchon de puits par déstructuration de la bentonite au moyen d'une solution saline.

La fermeture progressive des modules de stockage de combustibles usés relève, pour le reste, des mêmes dispositions que celles proposées pour les déchets C.



Concept KBS-3 (Suède) : principe de mise en place de conteneurs de combustibles usés en puits

3.2.4 Les galeries principales et les ouvrages de liaison surface-fond

Après fermeture de modules de stockage, leur accès est préservé par le maintien de la ventilation et du pompage des eaux. Cet état peut être maintenu aussi longtemps que sont assurées ces dispositions techniques et la surveillance des ouvrages.

Les étapes suivantes consistent à fermer les zones de stockage qui regroupent les modules d'une même catégorie de déchets puis les ouvrages de liaison entre la surface et les zones de stockage (puits, descenteries, galeries de liaison...). Comme dans les étapes précédentes, les galeries sont remblayées et scellées en des points spécifiques, en fonction notamment de la traversée éventuelle par les galeries de failles conductrices d'eau. Ceci s'accompagne de l'arrêt de la ventilation et du pompage de l'eau.

Ces étapes incluent le scellement, par des matériaux argileux gonflants (bentonite), des forages réalisés pendant la phase de reconnaissance du granite afin de prévenir les conséquences éventuelles, vis-à-vis de la sûreté à long terme, d'une connexion hydraulique non maîtrisée entre ouvrages.

3.2.5 Conclusion sur la gestion réversible du stockage

De manière générale, la grande stabilité mécanique d'excavations en milieu granitique favorise la capacité de retrait des colis et la flexibilité de gestion du processus de stockage sur de très longues durées. Il en va de même pour les conteneurs de stockage durables (plusieurs siècles au moins pour les déchets B, et plusieurs milliers d'années pour les déchets C, et encore supérieure pour les combustibles usés).

Cependant l'évolution des ouvrages peut à terme influencer sur la souplesse de gestion des colis et des installations. Ce point concerne essentiellement le gonflement, avec l'arrivée d'eau, des argiles de la barrière ouvragée des alvéoles de combustibles usés et de déchets C ainsi que, pour ces derniers, la lente corrosion du chemisage des alvéoles.

Par ailleurs, le maintien en exploitation sur de longues périodes de galeries souterraines, en particulier les perturbations dues à la ventilation et à l'exhaure (alvéoles de déchets B, galeries d'accès aux alvéoles, galeries de liaison), peuvent avoir un impact hydrogéologique et hydrogéochimique sur le granite ; ces perturbations dépendent du contexte du site et apparaissent, en tout état de cause, réversibles.

Dans une première étape du processus de stockage, les colis peuvent être gérés comme dans un entreposage. Ils peuvent être retirés avec les mêmes moyens que ceux de leur mise en place, de manière aussi souple qu'en entreposage. Puis, au fur et à mesure de la fermeture des ouvrages, le niveau de réversibilité diminue graduellement.

Pour les déchets C, la conception du chemisage des alvéoles lui confère une durabilité d'au moins 200 à 300 ans sans maintenance particulière, pratiquement indépendamment du franchissement des étapes de fermeture. Pour prolonger cette durée, il serait nécessaire, d'un point de vue technique, d'adopter des mesures de maintenance renforcée des alvéoles. Au-delà de la durée de vie du chemisage, le retrait des colis nécessiterait la mise en œuvre simultanée de moyens plus complexes.

Avant le retrait des colis de combustibles usés, il implique des moyens supplémentaires lorsque l'argile de barrière ouvragée s'hydrate et gonfle.

De manière générale, l'observation du stockage permettrait de réévaluer régulièrement l'évolution et la durabilité des composants (gonflement de l'argile gonflante, durée de vie du chemisage d'alvéole) et l'impact de l'exploitation des ouvrages sur le granite.

Une durée de deux à trois siècles constitue une durée envisageable pour gérer le processus de stockage de manière réversible sans nécessiter d'opérations lourdes d'un point de vue technique.

Dossier 2005 Granite

Le long terme et la sûreté

p.115 > 1. Evolution d'un stockage en milieu granitique

p.123 > 2. L'analyse de la sûreté à long terme

5

L'une des finalités principales du stockage en formation géologique profonde est d'offrir la possibilité de disposer d'une installation qui puisse, à terme, se passer de l'intervention de l'homme et évoluer de manière passive. Ce chapitre présente le comportement à long terme d'un stockage après sa fermeture ainsi que la démarche et les analyses de sûreté qui visent à s'assurer que le stockage pourrait évoluer, après fermeture, sans intervention de l'homme, tout en respectant les objectifs de protection de l'homme et de l'environnement.

Le mode d'analyse proposé, ou démarche de sûreté, repose sur plusieurs principes communs aux études de stockage en formation géologique profonde, argile et granite.

- L'analyse de sûreté s'appuie d'abord sur l'identification et la connaissance des phénomènes susceptibles de se dérouler dans un stockage en milieu granitique et sur la compréhension à long terme du stockage et de son environnement. Elle mobilise les travaux scientifiques, les résultats expérimentaux, les modélisations et leur mise en perspective sous forme d'une analyse phénoménologique.
- Toutefois, le stockage constitue, par le nombre et la durée des phénomènes qui s'y déroulent, un système d'une relative complexité. L'analyse de sûreté est un outil qui, à partir de la connaissance approfondie des phénomènes, les hiérarchise en mettant en lumière les points cruciaux et en représentant de manière simplifiée, mais robuste et réaliste, l'histoire du stockage dans le temps. Elle tire ainsi, d'une phénoménologie riche et complexe, un schéma prudent, ou scénario d'évolution normale, qui se prête à une représentation sous forme de modèles simplifiés robustes et à des simulations numériques. Partant de ce schéma, elle teste la pertinence des fonctions de sûreté imparties aux différents composants et évalue les performances globales du système de stockage. Elle prend en compte les incertitudes sur l'évolution du stockage, les limites de validité des modèles et les possibles variations des paramètres. Elle permet de hiérarchiser les incertitudes les plus importantes et s'attache aussi à traiter, dans un scénario d'évolution altérée, des situations qui échappent à l'évolution attendue, sous forme d'incidents indépendants de la volonté du concepteur (par exemple, intrusion dans le stockage) ou de défaillance prématurée de certains composants. Elle débouche sur un ensemble de calculs et d'évaluation qui visent à s'assurer de la conformité du stockage avec les objectifs de protection de l'homme et de l'environnement.

Sans site d'étude particulier, l'analyse de sûreté à long terme d'un stockage en milieu granitique ne peut prétendre être menée à un niveau permettant de conclure sur la robustesse d'une installation ou le caractère favorable d'un site spécifique. Dans le domaine des évaluations d'impact, les objectifs de radioprotection quantifiés sont prématurés faute de données de site. L'analyse a donc forcément un caractère préliminaire. Dans ce contexte, l'analyse de sûreté a été effectuée à partir d'architectures génériques de stockage proposées qui prennent en compte la variabilité des propriétés des granites dans le contexte géologique français. L'analyse phénoménologique s'est fondée sur l'ensemble des connaissances acquises sur le milieu granitique et le comportement des composants ouvragés du stockage, notamment à partir des expériences faites en laboratoires souterrains étrangers.

Ainsi structurée, l'analyse a permis d'identifier et de traiter les différentes questions relatives à la sûreté d'un stockage en milieu granitique, de vérifier qu'aucune des problématiques soulevées ne présente de caractère rédhibitoire et de mettre en exergue les points clés tant en termes de conception d'un stockage que des travaux qui seraient à mener sur un site particulier.

Références de la démarche de sûreté

La démarche de sûreté du *Dossier 2005 Granite* ne se plaçant ni dans le contexte d'une sélection de site, ni dans celui de l'évaluation d'un site donné, ne peut se référer à l'intégralité de la Règle fondamentale de sûreté III.2.f. émise par l'Autorité de sûreté nucléaire en 1991 et qui vise de telles démarches. Cependant, la RFS III.2.f. propose certains principes méthodologiques et options de conception qui sont adaptés même à un stade plus amont. A titre d'exemple, l'objectif général demandant de prendre toute disposition afin de limiter l'impact du stockage, et de prendre en considération cet impact en situation « normale » comme en situations incidentelles, est une orientation pertinente pour les études.

De manière générale, les recommandations de la RFS III.2.f. sont donc prises en compte pour les études, en adaptant le cas échéant leur interprétation à la nature du dossier.

Outre la RFS, les principes développés à l'international (projet de *safety requirement* de l'AIEA, définition du « safety case » de l'OCDE/AEN) ont inspiré le développement de la démarche de sûreté du *Dossier 2005 Granite*. Si ce dernier ne constitue pas un « safety case » au sens de l'AEN, les grands aspects traités par ces documents (importance de la clarté et de la transparence des argumentaires, nécessité de tracer l'origine des données, insistance sur la gestion des incertitudes...) ont été mis en œuvre pour la réalisation du dossier.

1 Evolution d'un stockage en milieu granitique

La compréhension de l'évolution phénoménologique du stockage, et de son environnement géologique et de surface, est étroitement associée à la conception et constitue l'un des fondements de l'évaluation de sûreté du stockage. Cette compréhension, au travers notamment de son exhaustivité, permet de rendre compte des processus qui contrôlent le comportement et la migration des radionucléides afin de vérifier que le stockage, tel qu'il est conçu, et son milieu géologique répondent aux exigences de sûreté à long terme.

Un stockage constitue un système complexe rassemblant plusieurs composants (colis, barrières ouvragées, milieu géologique) et faisant intervenir des phénomènes variés (thermiques, hydrauliques, chimiques, mécaniques), souvent couplés entre eux. Sous l'effet de ces phénomènes aux cinétiques différentes, les composants du stockage évoluent dans le temps.

Pour appréhender cette complexité, l'Andra a décomposé l'évolution du stockage en différentes situations : chacune correspond à l'état phénoménologique d'une partie du stockage ou de son environnement à un moment précis de la vie du stockage et reflète les phénomènes thermiques, hydrauliques, mécaniques, chimiques et radiologiques mis en jeu avec leurs enchaînements et leurs couplages. L'analyse concerne la période, séculaire à pluri-séculaire, de construction et d'exploitation du stockage jusqu'à sa fermeture ainsi que la période post-fermeture, soit une échelle de temps d'un million d'années.

L'ensemble de ces situations, appelé analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS), définit l'évolution phénoménologique complète et continue du stockage et de son environnement géologique. L'APSS fixe le cadre à l'analyse des phénomènes de relâchement et de transfert de radionucléides à prendre en compte dans les évaluations de sûreté à long terme.

1.1 Les grandes lignes de l'évolution d'un stockage

Parmi les dispositions conceptuelles proposées, le fractionnement du stockage en zones et modules distincts conduit à une évolution phénoménologique en grande partie propre à chacune des parties du stockage. Les phénomènes thermiques, mécaniques et chimiques mis en jeu ont une influence qui se limite pratiquement aux périmètres des différents modules de stockage.

Du point de vue hydraulique, l'excavation des ouvrages reliant la surface et le fond et celle des galeries et ouvrages souterrains entraîne, durant l'exploitation du stockage, un drainage des eaux qu'il faut examiner à l'échelle de l'ensemble du stockage. Après fermeture, le fractionnement du stockage par les ouvrages de scellements et le remblayage permet à chaque module d'avoir sa propre évolution.

La compartimentation des architectures proposées contribue ainsi à simplifier l'analyse. Elle peut être abordée de façon séparée pour décrire l'évolution des infrastructures générales du stockage (puits, descenderies, galeries de liaison...) et celle de chacune de ses zones (B, C et combustibles usés). D'autres dispositions contribuent également à simplifier les phénomènes à analyser :

- *le nombre réduit de composants ouvragés* dans les alvéoles de stockage limite les interfaces entre matériaux différents et les possibles interactions entre eux,
- *le dimensionnement des ouvrages* garantit leur stabilité mécanique sur le long terme, grâce à la grande résistance mécanique du granite. La composante mécanique n'est donc pas un élément moteur de l'évolution d'un stockage en milieu granitique,
- *le dimensionnement thermique* et des dispositions techniques limitent la température afin de rester dans des domaines où la description et la modélisation des phénomènes sont bien connues. Ainsi, une température maximum de 90 °C en tous points de la roche est un critère de dimensionnement retenu pour les zones de stockage de colis exothermiques.

1.1.1 Les infrastructures générales du stockage (puits, descenderie, galeries de liaison) : un court transitoire hydraulique et une très lente évolution chimique sur le long terme

Durant la construction et l'exploitation du stockage, les ouvrages d'infrastructure (puits, descenderie et galeries de liaison entre modules) drainent les eaux du granite *via* les fractures conductrices d'eau qu'ils recoupent. Ce drainage persiste jusqu'à la fermeture du stockage. L'excavation provoque une baisse rapide de la charge hydraulique dans les principales failles recoupées par les ouvrages, failles qui drainent l'essentiel de l'eau du granite en profondeur. Puis, avec un délai qui dépend de la connectivité des fractures entre elles, la charge hydraulique diminue progressivement dans les fractures de plus petite dimension.

Après la fermeture des ouvrages, la remise en charge hydraulique se produit de façon inverse. Les grandes failles retrouvent, après quelques mois, des niveaux de charges hydrauliques comparables à ceux existant avant excavation. Avec un délai qui dépend de l'organisation de la fracturation du granite, les fractures de moindre dimension et de moindre transmissivité hydraulique se rechargent aussi. Les ouvrages souterrains se remplissent progressivement d'eau. Les scellements de très faible perméabilité qui fractionnent les infrastructures rendent indépendantes les resaturations des différentes parties du stockage. Les ouvrages sont ainsi saturés au bout d'un délai qui dépend de la densité et des propriétés hydrauliques des fractures qu'ils recoupent ainsi que de la perméabilité des remblais mis en place. De façon générale, les durées en cause sont de l'ordre de la dizaine à quelques dizaines d'années. Elles sont courtes par rapport aux échelles de temps de plusieurs centaines de milliers d'années à considérer dans l'analyse. La décharge puis la recharge hydrauliques du granite entraînent donc une perturbation très transitoire de l'état hydraulique du massif granitique. A l'échelle du massif granitique, la situation hydraulique retrouve un état semblable à la situation avant stockage.

Le drainage de l'eau par le stockage peut entraîner des perturbations transitoires de la distribution des compositions chimiques des eaux dans le granite. En particulier, la stratification originelle d'eaux de plus en plus salines avec la profondeur peut être modifiée pendant l'exploitation du stockage. Le retour à des conditions initiales s'effectue à des échelles de temps supérieures (millier d'années) à la seule remise en charge hydraulique. Dans le contexte géologique français, ces possibles perturbations ne modifieraient que faiblement la composition chimique des eaux dans le stockage. Ces modifications ne sont pas de nature à nécessiter des dispositions de conception particulières, notamment pour la formulation des conteneurs ou des barrières ouvragées.

Après saturation des ouvrages, les mouvements d'eau dans les galeries de liaison dépendent essentiellement de la faible perméabilité des remblais et des fractures recoupées par les galeries. En effet, la zone endommagée du granite en paroi des ouvrages lors de l'excavation intervient peu sur les flux d'eau transférés par les galeries. Des tests au laboratoire canadien du Lac du Bonnet ont démontré la faible continuité hydraulique de la zone endommagée en paroi de galeries excavées par des techniques classiques avec utilisation d'explosifs. L'expérience « ZEDEX » au laboratoire d'Äspö en Suède a aussi démontré la très faible extension de l'endommagement de la roche en paroi des ouvrages et de sa transmissivité hydraulique si l'on recourt à des techniques par foration, microtunnelier par exemple. Ainsi, la zone endommagée n'a qu'un rôle très limité de drainage. Par ailleurs, la faisabilité de scellements de très faible perméabilité ancrés dans la roche saine a été prouvée au laboratoire du Lac du Bonnet (« Tunnel Sealing Experiment »). Ces scellements limitent les flux d'eau entre les portions des galeries où prévaut un régime hydraulique, diffusif ou mixte diffusif/convectif, correspondant à des mouvements très lents.

Après fermeture des galeries et leur resaturation, des échanges chimiques interviennent entre les eaux du granite et les remblais. L'environnement légèrement oxydant (air de ventilation et arrivée éventuelle d'eaux provenant des parties plus superficielles du granite) devient anoxique, puis réducteur. Des expériences en laboratoire souterrain et sur échantillons de granite (notamment « REX » dans le laboratoire d'Äspö) ont démontré la capacité naturelle des minéraux du granite à fixer l'oxygène de l'eau. Sur le long terme, les remblais étant composés à plus de 70 % de roche granitique broyée, les eaux ont tendance à être en équilibre avec la roche et les échanges chimiques sont limités.

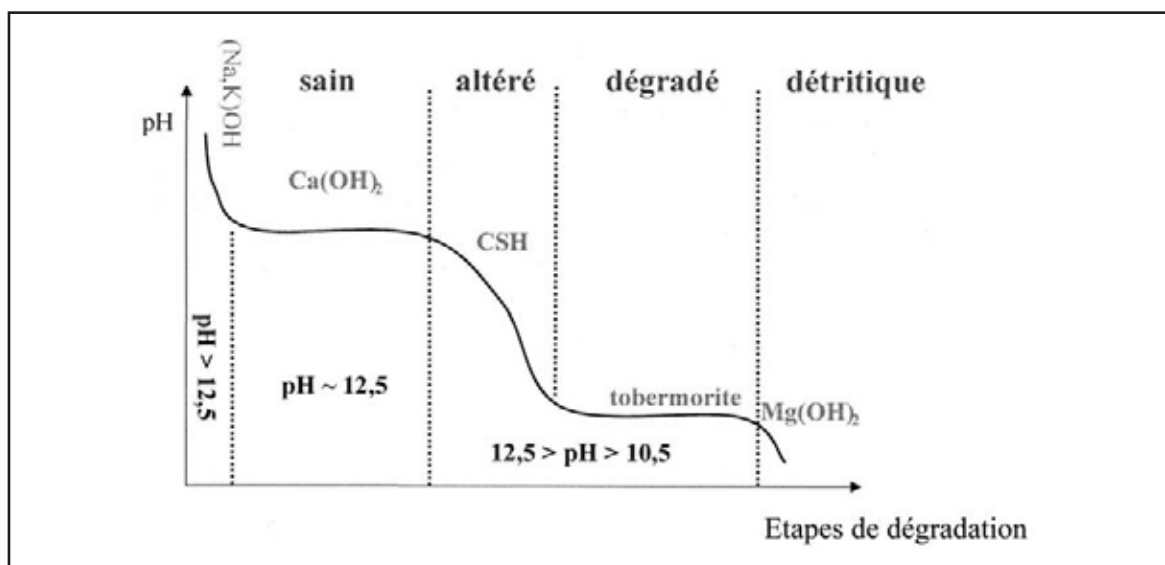
En résumé, les ouvrages d'infrastructure (puits, descenderie, galeries de liaison) évoluent très peu sur le long terme : ceci résulte à la fois de la stabilité mécanique de la roche granitique et de l'absence corrélative de soutènements métalliques, d'une composition des remblais très proche du granite et de la très faible cinétique des mouvements d'eau en profondeur.

1.1.2 Les modules de stockage de déchets B : une évolution chimique très lente dominée par l'environnement cimentaire des colis de déchets

Par conception, les tunnels et les galeries d'un module de stockage de déchets B sont implantés dans des blocs de granite de faible perméabilité et très peu fracturés. Ainsi, pendant la construction et l'exploitation du module, l'évolution phénoménologique des tunnels de stockage se réduit à un très faible drainage de l'eau du granite par les petites fractures en paroi des tunnels. L'eau est évacuée par les effets de la ventilation ou par un système d'évacuation spécifique. L'altération des colis de stockage en béton se limite aux effets superficiels et négligeables de la ventilation. Les gaz de radiolyse (hydrogène) éventuellement dégagés par certains colis (déchets bitumés B2 par exemple) sont évacués par la ventilation et n'ont pas de conséquence sur l'évolution des colis eux-mêmes. L'empilement de colis faiblement exothermiques du type B1 ou B5 augmente la température mais les tunnels sont dimensionnés pour ne pas dépasser 70 °C, même en cas d'arrêt de leur ventilation après mise en place des colis. Les maxima sont atteints en quelques années. Pour les autres types de déchets B, non exothermiques, il n'y a pas d'augmentation significative de température.

Avec la fermeture des tunnels de stockage, l'arrêt de la ventilation et de l'exhaure entraîne leur resaturation. La cinétique de resaturation dépend de la densité des petites fractures en paroi des tunnels : la durée peut ainsi varier de la dizaine à quelques centaines d'années, voire le millier d'années dans certaines configurations de fracturation. L'eau va progressivement envahir les tunnels de bas en haut. Après resaturation, il n'y a plus de différence de charge hydraulique entre les tunnels de stockage et le granite encaissant : les mouvements d'eau dans les tunnels sont donc très limités, ce qui entraîne un régime de transfert à dominante diffusive.

Dans ce contexte, l'évolution d'un tunnel de stockage est essentiellement liée à la lente évolution chimique des empilements de colis de stockage en béton. Du point de vue mécanique, la dégradation des colis de stockage peut entraîner, à très long terme (dizaines à centaines de milliers d'années), une perte de la cohésion des empilements avec réajustement de leur agencement dans les tunnels de stockage. Cependant, l'altération des colis de stockage modifie peu les conditions d'environnement chimique des alvéoles essentiellement dominées par une ambiance réductrice et fortement alcaline (pH diminuant de 12,5 à 10 sur ces échelles de temps), favorable à l'immobilisation d'une grande partie des radionucléides dans les tunnels.



Les étapes de dégradation d'un béton

Les eaux alcalines résultant des échanges chimiques entre eau du granite et bétons des colis de stockage peuvent modifier les propriétés du granite en paroi. Les petites fractures en paroi des tunnels se colmatent par la précipitation de carbonates, ce qui réduit les possibilités de transfert. Ce point a été démontré par l'expérience « HPF » (Hyperalcaline Plume in Fractured Rock) au laboratoire du Grimsel (Suisse). Cependant, la roche granitique, par sa composition minéralogique, n'est affectée que superficiellement par les eaux alcalines.

Le scellement des tunnels de stockage peut aussi être affecté par l'alcalinité des eaux qui est susceptible d'altérer les propriétés (très faible perméabilité, capacité de gonflement et de rétention) et les performances du noyau d'argile gonflante qui constitue, sur une dizaine de mètres de longueur la partie fonctionnelle du scellement. Toutefois, l'extension de ces perturbations est, selon les estimations, inférieure à 2 mètres sur un million d'années : la majeure partie du scellement garde donc ses performances à long terme, ce qui contribue à maintenir, dans les tunnels, un régime dominant de transfert par diffusion.

La production de gaz par les colis peut aussi perturber l'évolution phénoménologique des tunnels de stockage à long terme. La radiolyse de certains déchets (boues bitumées) et, surtout, la corrosion de l'acier des composants ouvragés (conteneurs des déchets primaires) entraînent une production d'hydrogène. De façon préliminaire, les bilans indiquent que la pression de gaz pourrait dans certaines conditions dépasser la pression hydraulique naturelle, soit 4 à 5 MPa. Dans cette hypothèse, il peut y avoir transfert d'hydrogène gazeux vers les petites fractures du granite et vers les galeries à travers le scellement. A ce stade, il n'a pas été réalisé de modélisation quantitative complète ; on peut toutefois indiquer que le stockage et le réseau de galeries offrent un volume d'expansion significatif pour la dispersion du gaz. En outre, les conséquences de l'existence d'une phase gazeuse sur le transport de radionucléides ont fait l'objet de l'expérience « GAM » au laboratoire du Grimsel en Suisse. Cette dernière a montré que le transfert et la rétention de radionucléides dans des fractures étaient peu perturbés.

En résumé, l'évolution d'un tunnel de stockage est essentiellement déterminée par la pérennité de l'environnement cimentaire des colis de déchets tout au long de la vie du stockage, ce qui assure des conditions durables à l'immobilisation des radionucléides sur de très longues durées.

1.1.3 Les modules de stockage de déchets C vitrifiés et de combustibles usés : une phase thermique et une très lente évolution chimique tamponnée par les barrières ouvragées en argile gonflante

La fermeture des modules de stockage entraîne leur resaturation progressive. L'eau provenant des fractures du granite sature progressivement les remblais des galeries de manutention ainsi que les bouchons et les barrières ouvragées en argile gonflante des puits de stockage distribués le long des galeries de manutention. Le temps de resaturation des puits de stockage peut varier de la dizaine à quelques centaines d'années, voire plus, selon les propriétés hydrauliques des fractures du granite. Par conception, en effet, les puits de stockage sont implantés dans la roche granitique peu ou non fracturée.

• Le puits de stockage et la barrière ouvragée

Le phénomène transitoire de gonflement des anneaux de bentonite autour des surconteneurs en acier est aussi affecté par la chaleur dégagée par les colis C. Le couplage des phénomènes thermiques avec la resaturation des barrières ouvragées a fait l'objet de nombreuses études et expérimentations en laboratoires souterrains : expériences « FEBEX » à Grimsel en Suisse ou « Prototype Repository » à Äspö testant, *in situ*, des concepts de stockage de combustibles usés, expérience « TBT » testant le comportement de barrières ouvragées en bentonite à des températures voisines ou supérieures à 100 °C. Ces travaux ont permis de bien comprendre les phénomènes et de maîtriser la modélisation du gonflement, de la mise en pression et du comportement des ouvrages en argile gonflante sous sollicitation thermique. A cet égard, le choix d'un dimensionnement thermique des ouvrages limitant la température dans les puits de stockage à 90°C est un élément de simplification et de robustesse des simulations. La pression de gonflement du bouchon et des barrières ouvragées atteint une valeur d'environ 5 à 7 MPa.

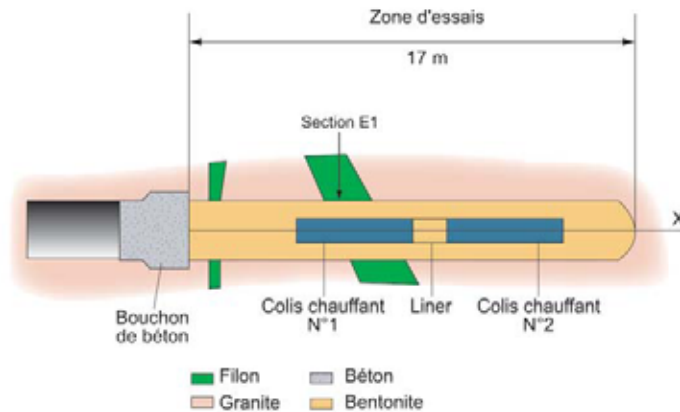
Expérience sur les barrières ouvragées en argile gonflante

Le mécanisme de gonflement d'argile, comme la bentonite, est compris et bien maîtrisé depuis des décennies. Vis-à-vis des études de stockage, maîtriser le gonflement de barrières ouvragées en argile gonflante implique de l'appréhender à l'échelle des ouvrages, c'est-à-dire de démontrer que :

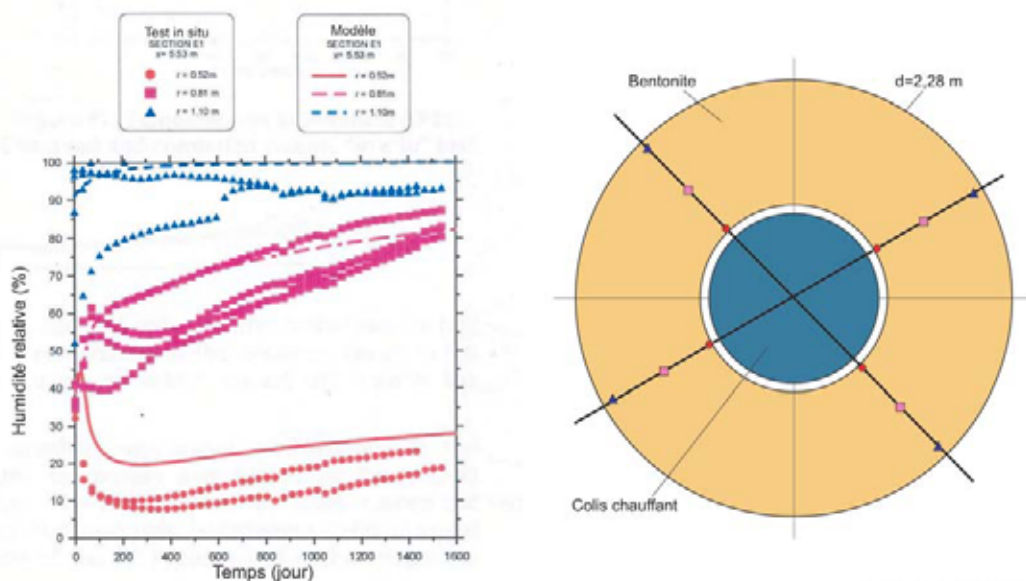
- les discontinuités (« joints ») entre les éléments qui composent les ouvrages (briques ou anneaux) n'empêchent pas un gonflement homogène,
- la chaleur dégagée par les colis n'induit pas de phénomènes perturbant de façon irréversible le gonflement de la barrière ouvragée.

Depuis les années 80, des expériences en laboratoires souterrains ont examiné ces deux aspects, d'abord à des échelles réduites puis à l'échelle 1 dans des conditions équivalentes à des situations de stockage.

L'expérience FEBEX au laboratoire du Grimsel teste depuis 1997 le comportement de barrière ouvragée en bentonite dans un ouvrage horizontal de grande dimension. Deux sources chauffantes simulent des colis de combustibles usés. L'eau du granite peu fracturé resature la bentonite qui gonfle progressivement depuis la partie externe vers la partie interne proche du colis. Ce gonflement a fait l'objet d'un suivi instrumental pendant toute l'expérience depuis 1997. En 2002, la partie de l'ouvrage correspondant au colis chauffant le plus proche de l'entrée de l'ouvrage (colis chauffant n° 1) a été démantelée (figure ci-dessous).



Dispositif de l'expérience FEBEX au laboratoire du Grimsel (Suisse)



G.PL.FSTE.05.0121.0

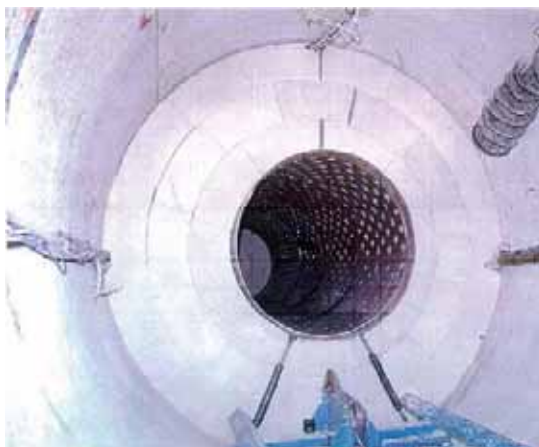
Evolution de la resaturation de la bentonite de la barrière ouvragée

...

...

Le suivi instrumental du gonflement de la barrière ouvragée montre que le gonflement est conforme aux modèles prévisionnels prenant en compte l'échauffement par les colis. L'expérience a confirmé, *in situ*, les résultats obtenus sur échantillons ou sur maquette testée à échelle réduite et en conditions de laboratoire.

Le démantèlement d'une partie du dispositif expérimental a aussi montré que les joints existant entre les briques de bentonite lors de la construction de la barrière ouvragée ne se marquent plus après gonflement. Ces joints ne sont plus susceptibles d'être des chemins préférentiels de l'eau dans l'ouvrage. Le gonflement est complet sur l'ensemble de l'ouvrage.



a/ Avant gonflement, les briques d'argile gonflante ne sont pas complètement jointives



b/ Après resaturation de l'ouvrage, les joints entre briques ne sont plus apparents du fait du gonflement de la barrière ouvragée

Après resaturation des puits de stockage et gonflement du bouchon d'alvéole et de la barrière ouvragée en bentonite, les flux d'eau au travers des puits de stockage sont très faibles. Il en résulte de très lents phénomènes de transfert par diffusion. Dans les puits de stockage, la température atteint son maximum, limité par conception à 90 °C, quelques dizaines d'années après fermeture, puis diminue progressivement pour revenir, après quelques milliers d'années (déchets C) ou une dizaine de milliers d'années (combustibles usés), à des températures proches des températures géothermiques naturelles.

Dans cette configuration, l'évolution des puits de stockage se réduit aux très lents échanges chimiques entre l'eau, les colis de stockage et la barrière ouvragée bentonitique.

• Le surconteneur et le chemisage en acier des puits de stockage de déchets C

Pour les déchets C, le colis de stockage est un surconteneur en acier de 55 mm d'épaisseur. Un chemisage en acier de 25 mm d'épaisseur est disposé entre les colis et la barrière ouvragée argileuse pour permettre la mise en place des colis et faciliter leur retrait. Le surconteneur en acier et le chemisage peuvent s'altérer sous l'effet, d'abord du milieu partiellement oxydant lors de la resaturation des puits de stockage, puis du milieu réducteur dû à l'eau du granite. L'altération oxydante est très fortement limitée par le bouchon d'alvéole et la barrière ouvragée en bentonite. A long terme, c'est la corrosion des aciers en milieu réducteur avec production d'hydrogène qui constitue le principal facteur d'altération du surconteneur et du chemisage. L'hydrogène augmente progressivement en pression. Comme pour le cas des déchets B, la pression de gaz pourrait, dans certaines conditions dépasser la valeur de la pression hydrostatique dans les puits de stockage (4 à 5 MPa) et induire un transfert du gaz au travers de la barrière ouvragée argileuse, vers les petites fractures ou les galeries de manutention sus-jacentes.

La réaction des produits d'altération (oxydes de fer) avec la bentonite des barrières ouvragées peut altérer la capacité de gonflement de ces dernières. Toutefois, l'épaisseur de barrière ouvragée concernée est suffisamment peu importante au regard de l'épaisseur totale de la barrière (60 cm) pour que les propriétés de gonflement soient significativement affectées.

La vitesse de corrosion du surconteneur en acier en milieu réducteur est très faible : de l'ordre du micron par an, ce qui assure son étanchéité pendant plusieurs milliers d'années avec le dimensionnement proposé. L'eau entre ainsi au contact du verre des déchets lorsque la température au cœur des colis est inférieure à 50°C, ce qui limite le taux de lixiviation du verre et ainsi celui du relâchement de radionucléides.

Du point de vue mécanique, la dégradation à long terme du surconteneur entraîne un réajustement progressif de la barrière ouvragée gonflante et de la disposition interne des puits de stockage. Ceci n'affecte pas l'environnement chimique des colis de verre. Le relâchement de radionucléides s'effectue en milieu réducteur et en régime de transfert diffusif contrôlé par les barrières ouvragées argileuses, ce qui est favorable à l'immobilisation des radionucléides dans les puits de stockage.

• Le conteneur en cuivre du concept de stockage des combustibles usés

Le concept de stockage pour les combustibles usés se fonde sur l'étanchéité d'un conteneur en cuivre, durable au-delà de plusieurs centaines de milliers d'années. Cette étanchéité est conditionnée par le maintien dans les puits de stockage d'un environnement physico-chimique assurant la stabilité thermodynamique du cuivre. Ainsi, la conception exclut la présence de composants en acier dans les puits de stockage, ce qui évite toute interaction entre des métaux différents. De plus, les barrières ouvragées et bouchons des puits de stockage au contact des conteneurs après resaturation assurent un environnement chimique réducteur favorable à la stabilité du cuivre. La bentonite des barrières ouvragées (35 cm d'épaisseur) « tamponne » tout élément qui serait susceptible de modifier l'environnement du conteneur. L'absence d'altération significative sur le long terme du conteneur en cuivre empêche la formation de produits de corrosion susceptibles d'affecter les performances de gonflement d'une partie des barrières ouvragées. Au total, à long terme, l'évolution des puits de stockage se limite à la réponse des barrières ouvragées à des changements externes au stockage en lien avec l'évolution géodynamique du site. Dans le contexte géodynamique français, les modifications prévisibles sont, à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années, de faible amplitude et ne sont pas en mesure de modifier significativement l'environnement physico-chimique du conteneur en cuivre.

En résumé, l'évolution des puits de stockage de déchets C et de combustibles usés se caractérise, pendant la phase thermique, par le progressif gonflement des bouchons et des barrières ouvragées autour des colis de stockage, qui entraîne l'installation d'un lent régime de transfert diffusif. Après leur gonflement, les barrières ouvragées en argile gonflante assurent, sur le long terme, un environnement physico-chimique favorable au maintien de l'étanchéité des colis de stockage et à l'immobilisation des radionucléides relâchés.

1.2 Les points marquants de l'évolution d'un stockage vis-à-vis du relâchement et du transfert des radionucléides

L'évolution phénoménologique d'un stockage en milieu granitique définit le cadre du relâchement des radionucléides des colis de déchets, puis de leur éventuel transfert depuis le stockage jusqu'à la biosphère.

Le vecteur du relâchement et du transfert des radionucléides est principalement l'eau. L'implantation des alvéoles de stockage dans des volumes de roche granitique très peu perméables et la mise en place de remblais et scellements de faible et très faible perméabilité conduisent à des mouvements d'eau très faibles dans le stockage qui contribuent à limiter le relâchement et le transfert de radionucléides dans les ouvrages.

Radionucléides : des comportements spécifiques en terme de solubilité et de rétention

Les radionucléides se répartissent en trois grandes familles en terme de solubilité et de rétention vis-à-vis du milieu granitique (roche et fractures), du milieu argileux bentonitique de composants ouvragés (remblais à base d'argile gonflante, bouchons d'alvéoles ou barrières ouvragées) ou du milieu cimentaire (alvéoles B) :

- les éléments « mobiles » : solubilité élevée, rétention faible ou nulle, comme l'iode ou le chlore,
- les éléments « moyennement mobiles » : solubilité élevée, rétention forte, comme le césium,
- les éléments « très peu mobiles » : solubilité faible, rétention forte, comme les actinides (uranium et plutonium par exemple) et les lanthanides (samarium et europium par exemple).

L'inventaire radiologique des colis de déchets comporte surtout des éléments des deux dernières familles.

1.2.1 Un relâchement lent et limité hors du stockage

Hors le cas du stockage des combustibles usés pour lequel les options proposées prévoient la conception d'un conteneur en cuivre étanche de façon pérenne, le relâchement de radionucléides par les colis de déchets est consécutif à la dégradation des colis de stockage par l'eau de resaturation des alvéoles : tunnels de stockage des déchets B et puits de stockage des déchets C vitrifiés.

Le délai d'arrivée de l'eau sur les déchets dépend de la cinétique de resaturation des alvéoles de stockage qui varie de la dizaine à quelques centaines d'années, voire le millier d'années dans certaines configurations de fracturation.

• La lente altération chimique des colis B dans les tunnels de stockage

A l'arrivée de l'eau au contact des déchets, seuls les éléments radioactifs localisés en surface des déchets sont relâchés. Le relâchement des autres radionucléides s'effectue à mesure de l'altération progressive des déchets, qui s'échelonne entre quelques dizaines de milliers d'années pour certains déchets métalliques (aciers noirs, aciers inoxydables...) et les boues bitumées (B2), et quelques centaines de milliers d'années pour d'autres déchets métalliques (alliage de zirconium). Les flux de radionucléides relâchés dépendent des propriétés du béton des colis de stockage. Dans le cas de conteneur standard (déchets B2 par exemple), le flux de radionucléides relâchés par les colis de stockage est essentiellement limité par les propriétés alcalines des eaux interstitielles des bétons. Dans le cas de conteneurs auxquels sont allouées des capacités de confinement complémentaires (déchets B1, B5.2), les propriétés hydrauliques du béton (faible perméabilité et faible coefficient de diffusion) entraînent une diminution très significative du flux de radionucléides relâchés aussi longtemps que ces propriétés sont maintenues (milliers à dizaine de milliers d'années).

• La faible cinétique de corrosion des surconteneurs en acier des déchets C et la lente dissolution aqueuse des verres

Dans les puits de stockage de déchets C, le relâchement de radionucléides débute après la perte d'étanchéité des surconteneurs, après plusieurs milliers d'années. L'arrivée d'eau au sein des colis initie alors le processus de dissolution du verre et le relâchement des radionucléides. La dissolution des verres enrobant les déchets C se poursuit pendant quelques milliers d'années pour les verres C0 à quelques centaines de milliers d'années pour les verres C1, C2, C3 et C4.

• Les alvéoles de stockage : des environnements physico-chimiques évoluant peu et contribuant à une faible mobilité des radionucléides

Les environnements physico-chimiques des alvéoles (B et C) conduisent à une forte rétention et à une faible solubilité de la plupart des radionucléides relâchés : la majorité est adsorbée (piégée) ou précipite au sein des alvéoles. Au final, la concentration des radionucléides dans l'eau des alvéoles de stockage est faible. Combinés à un régime de transfert essentiellement diffusif, ces phénomènes conduisent à des temps de transfert suffisamment longs dans les alvéoles entre colis et paroi rocheuse pour permettre la disparition d'un grand nombre de radionucléides par décroissance radioactive.

1.2.2 Le granite et la limitation du transfert des radionucléides les plus mobiles vers l'environnement

Les radionucléides les plus mobiles et à vie longue sont susceptibles de migrer, dans les alvéoles de stockage, depuis les colis de stockage jusqu'à la paroi rocheuse. La roche granitique constitue une barrière efficace au transfert des radionucléides compte tenu de sa très faible perméabilité, de sa faible porosité et, corrélativement, de ses faibles propriétés de diffusion : les cinétiques de transfert (par diffusion) y sont de l'ordre du millimètre à l'échelle du millier ou de plusieurs milliers d'années. Les quelques petites fractures légèrement conductrices d'eau qui affectent la roche en paroi constituent ponctuellement les seules possibilités de transfert des radionucléides hors des alvéoles. Les propriétés géométriques, minéralogiques et hydrauliques des petites fractures, ainsi que les faibles gradients hydrauliques, font que les flux de radionucléides susceptibles d'être transférés hors des alvéoles sont faibles.

Le transfert des radionucléides hors des alvéoles s'effectue également par diffusion vers les galeries du stockage au travers des scellements et des remblais.

Dans les galeries d'accès, le transfert des radionucléides vers le granite s'effectue par les fractures, petites ou moyennes, susceptibles d'être recoupées. La faible perméabilité et les propriétés de rétention des remblais et des scellements sont des facteurs complémentaires de retard au transfert des radionucléides dans le stockage.

Ainsi, les radionucléides susceptibles de migrer hors du stockage sont les éléments les plus mobiles et à vie longue. On peut citer en particulier : l'iode 129, le chlore 36, le césium 135, le carbone 14 et le technétium 99 dans le cas des déchets B ; l'iode 129, le césium 135, le carbone 14 et le sélénium 79 dans le cas des déchets C.

1.2.3 Le transfert des radionucléides dans le massif granitique et l'environnement du stockage

Après leur transfert dans les petites fractures du granite, les radionucléides migrent vers des fractures (failles), généralement de plus grande dimension et plus transmissives hydrauliquement. L'organisation des cheminements dépend de celle du réseau de fractures et en particulier de leur connexion hydraulique. A l'échelle d'un module, notamment pour les plus grands (déchets C), les cheminements sont multiples, ce qui conduit à un fractionnement et une dispersion des flux de radionucléides vers l'environnement et les différents exutoires naturels en surface. Sont essentiellement concernés les radionucléides les plus mobiles et à vie longue comme l'iode 129 et le chlore 36. Les autres radionucléides susceptibles de sorption ou de précipitation dans les fractures (césium 135, technétium 99, sélénium 79, carbone 14) sont fortement retardés lors des cheminements.

2 L'analyse de la sûreté à long terme

Dans ses principes, la démarche de sûreté se fonde en premier lieu sur le comportement du stockage tel qu'il peut être anticipé au vu des connaissances scientifiques acquises. Elle s'attache à formaliser ces connaissances dans le cadre d'un modèle de sûreté qui propose une représentation simplifiée, mais prudente, des phénomènes et de leur déroulement dans le temps. Elle teste également les limites de validité de cette représentation en évaluant les conséquences qu'aurait la variation de certaines données sur la performance globale. Plus avant, elle s'attache aussi à traiter des situations qui échappent au modèle d'évolution prévu ou envisagé par le concepteur du stockage. Ces événements font également l'objet d'une représentation et on s'efforce d'en apprécier l'importance au regard de leur vraisemblance et de leurs conséquences. Ce faisant, la démarche examine les incertitudes qui peuvent subsister et montre comment elles sont prises en compte.

Ce travail débouche *in fine* sur des évaluations quantitatives, notamment sous forme d'indicateurs caractérisant l'impact éventuel du stockage sur l'homme et l'environnement et les performances des fonctions de sûreté. Il porte un jugement sur la validité de ces fonctions de sûreté et constitue un test de la robustesse d'ensemble du système.

Une adaptation de la démarche au contexte générique des études du milieu granitique

Sans site spécifique d'étude, l'évaluation de la sûreté à long terme d'un stockage en milieu granitique ne peut prétendre porter de conclusion précise sur les performances du système étudié relativement à un site granitique particulier.

Cependant, à partir des architectures génériques de stockage proposées, l'analyse a examiné l'ensemble des questions liées au stockage en milieu granitique. Dans ce contexte d'études génériques, elle s'est également appuyée sur le retour d'expérience des évaluations faites à l'étranger, notamment par une confrontation des analyses faites avec les bases « FEP's » internationales.

Pour prendre en compte la variabilité possible des propriétés des granites français, trois modèles géologiques de site ont été établis. Fondés sur l'analyse des propriétés des granites français, ces modèles sont représentatifs du contexte géologique français. Sans prétendre à l'exhaustivité des configurations pouvant être rencontrées, ils permettent d'examiner en quoi les grandes caractéristiques d'un massif granitique interviennent dans l'évaluation de la sûreté d'un stockage à long terme.

L'analyse de sûreté du *Dossier 2005 Granite* a un caractère méthodologique : aussi, l'Andra a étendu le spectre des méthodes déjà mises en œuvre, en a développé certaines et s'est attachée à maîtriser les outils disponibles à l'international pour réaliser des évaluations de sûreté en milieu fracturé.

La confrontation aux bases « FEP'S » internationales

Les bases FEP's internationales dressent la liste des caractéristiques d'un site et des composants ouvragés d'un stockage (« Features ») ainsi que celle des événements (« Events ») et des phénomènes (« Processes ») pouvant intervenir dans l'évolution du stockage. Elles constituent ainsi un référentiel des éléments à prendre en compte dans les analyses de sûreté.

A partir des bases FEP's internationales, destinées à divers types de formation-hôte, une base FEP's, adaptée au contexte générique du granite a été établie dans un esprit de recherche d'exhaustivité et de cohérence avec les bases de données des homologues étrangers de l'Andra. Ainsi, une comparaison systématique a été menée avec les bases internationales de l'OCDE/AEN.

Une deuxième étape a consisté à la confronter avec les différents composants des architectures génériques de stockage proposées et les phénomènes pris en compte dans l'évolution phénoménologique « normale » d'un stockage. L'analyse des FEP's a conduit à distinguer celles dont l'occurrence est attendue (« FEP's en évolution normale ») de celles qui relèveraient d'un dysfonctionnement (« FEP's en évolution altérée »).

2.1 De la compréhension des phénomènes aux calculs de sûreté

L'évolution phénoménologique du stockage en milieu granitique s'appuie sur les connaissances acquises sur le milieu et reflète l'évolution attendue par le concepteur au travers des dispositions de conception retenues pour limiter la complexité des phénomènes et les incertitudes sur le comportement phénoménologique. Elle représente en ce sens les évolutions d'un stockage jugées les plus probables, qualifiées de « normales ». Sa description au moyen de l'analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) constitue ainsi un élément important de l'analyse de sûreté.

Evaluer les performances d'un stockage au moyen de calculs prenant en compte les phénomènes mis en jeu dans son évolution implique de les intégrer en une histoire simplifiée et cohérente. Cette histoire retient des hypothèses prudentes ; les simplifications doivent en effet s'opérer dans le sens du conservatisme. Elle constitue un scénario qui ne prétend pas représenter la réalité telle qu'elle se déroulera mais entend englober l'éventail de situations probables, dans une vision pénalisante. Ce scénario constitue la base d'une évaluation numérique qui mobilise divers modèles. Ce sont les calculs de sûreté qui débouchent sur des indicateurs de performance du stockage.

2.1.1 Le traitement des incertitudes et les scénarios étudiés dans le cadre des études génériques sur le granite

L'analyse de sûreté et l'atteinte des objectifs de sûreté sont indissociables de l'identification et du traitement des incertitudes. Dans le contexte d'études génériques sur le milieu granitique, l'objectif a consisté à identifier les grands types d'incertitudes devant être traités pour la conception d'un stockage en milieu granitique, et à évaluer au travers de leur analyse et de calculs associés les paramètres déterminants de la sûreté d'un stockage et les risques associés.

Les différents scénarios traités ont ainsi permis de préciser la place des principaux composants du stockage (colis, bouchon et scellements, milieu géologique) par rapport aux fonctions de sûreté du stockage : « s'opposer à la circulation d'eau dans le stockage », « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage », « retarder et atténuer la migration des radionucléides ». Sans prétendre à l'exhaustivité, le choix des scénarios s'est appuyé sur la confrontation de la base FEP's granite avec les bases FEP's internationales pour identifier des familles de « FEP's en évolution normale » et de « FEP's en évolution altérée » permettant, au travers de scénarios enveloppes, de traiter les principales incertitudes.

Une typologie des incertitudes

On distingue des incertitudes relatives aux caractéristiques du stockage (« Features »), à des événements externes au stockage (« Events ») et à la phénoménologie de l'évolution du stockage (« Processes »).

• Les incertitudes sur les caractéristiques du stockage (« Features »)

- sur les données d'entrée du projet de stockage, c'est-à-dire sur l'inventaire et les caractéristiques des colis, indépendamment de leur comportement en stockage,
- sur les caractéristiques intrinsèques du milieu géologique ou d'un composant du stockage. Elles peuvent être liées aux imprécisions des techniques de mesure ou à certaines grandeurs qui ne sont pas directement accessibles à la mesure et pour lesquelles on se réfère alors à des données disponibles dans la bibliographie. Elles peuvent être aussi dues à la variabilité du composant dans l'espace au regard d'un échantillonnage nécessairement limité. Il en va ainsi de la caractérisation de la roche sur échantillons,
- sur les technologies. Au stade d'une approche générique, les dispositions technologiques à mettre en œuvre ne peuvent pas être figées. Il s'agit donc de prendre en compte les incertitudes dues à la variabilité des conditions possibles d'exploitation du stockage ainsi qu'à une limitation des connaissances sur les conditions de mise en œuvre d'une technologie particulière dans un contexte souterrain.

• Les événements externes (« Events »)

Ils constituent une forme d'incertitude particulière sur l'évolution du stockage. On distingue en général les phénomènes d'origine naturelle se produisant à la surface (événements climatiques, tectoniques, etc.) qui sont prédictibles dans leur principe mais souvent entachés de grandes incertitudes et les événements dus à l'action de l'homme (intrusion, effets anthropiques) qui sont dans la plupart des cas imprévisibles au-delà d'une échéance raisonnable. Ces événements sont assimilés à des incertitudes au titre des perturbations qu'ils induisent. Des approches partiellement conventionnelles sont retenues classiquement pour limiter l'ampleur des incertitudes à prendre en compte. Conformément à la RFS III.2.f., on suppose en particulier que le comportement humain futur sera globalement le même qu'aujourd'hui. Il est possible en revanche d'adopter une démarche prédictive, fondée sur les évolutions passées, pour la plupart des phénomènes naturels. Même dans ce cas, les incertitudes sur le lointain futur sont à prendre en compte.

• Les incertitudes sur les phénomènes régissant l'évolution du stockage (« Processes »)

Une fois acquises les données concernant l'ensemble des composants du système, il faut comprendre et représenter comment ces différents éléments entrent en relation et agissent sur l'évolution du système. La complexité des phénomènes ne permet pas nécessairement de disposer d'une compréhension détaillée de chaque interaction et contraint à adopter une représentation d'ensemble du milieu qui transcrit au mieux la compréhension du fonctionnement du système. La représentation par un modèle est entachée d'incertitudes dans la mesure où elle procède par simplification par rapport à une représentation plus détaillée des phénomènes. C'est particulièrement le cas pour les phénomènes couplés, généralement plus difficiles à représenter. Entrent dans cette catégorie des incertitudes dues à la nécessité de prévoir le comportement sur des temps longs ou liées aux limites de validité des modèles ou à l'existence de plusieurs modèles rendant compte d'un même ensemble de constatations empiriques.

Un scénario d'évolution normale (SEN) d'un stockage dans le granite conduit à analyser le fonctionnement d'un stockage tel qu'anticipé. Au travers de différents calculs de sensibilité, il permet aussi d'apprécier les incertitudes associées à la caractérisation des propriétés hydrauliques et de transport du milieu granitique, ainsi que les incertitudes associées à la caractérisation des principales propriétés des composants ouvragés. Le scénario d'évolution normale traite ainsi les plus importantes incertitudes associées à la conception d'un stockage et qu'il s'agirait de gérer tout au long d'une reconnaissance de site.

Des scénarios d'évolution altérée (SEA) ont traité les cas de défaillances des principaux composants ouvragés du stockage (colis, bouchons et scellements) ou de défaillance dans la démarche de reconnaissance d'un site granitique. Ces scénarios enveloppent pour une grande partie l'ensemble des défaillances et incertitudes relatives au processus de stockage.

2.1.2 La démarche de modélisation

• Quels indicateurs ?

Sans site d'étude particulier, évaluer la sûreté d'un stockage à partir d'un impact calculé en terme de dose et qui ferait intervenir des conditions d'environnement de site spécifiques n'aurait pas de sens. Dans un contexte d'études génériques du milieu granitique, ce sont donc des indicateurs intermédiaires qui ont été mobilisés afin de comprendre le fonctionnement individuel de chacun des principaux composants du stockage :

- des indicateurs relatifs aux quantités d'eau se transférant dans les différentes parties du stockage évaluent la performance du stockage vis-à-vis de la fonction « s'opposer à la circulation d'eau »,
- la quantité de radionucléides en certains points clés du stockage à différentes phases de son évolution évalue les performances de confinement des différents composants et contribue à identifier les éléments de robustesse d'ensemble. Cet indicateur a plus particulièrement trait aux fonctions « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » et « retarder et atténuer la migration des radionucléides ».

• Quels modèles et valeurs de paramètres ?

Le travail de recherche étant conduit sur des sites génériques, il importe de préciser dans quelles conditions ont été définis les massifs granitiques modélisés dans le calcul.

Il existe relativement peu de massifs en France qui ont été reconnus du point de vue géologique et hydrogéologique avec le niveau de caractérisation suffisant pour permettre une modélisation rendant compte des propriétés d'un site particulier. De plus, un calcul sur site spécifique serait en contradiction avec les objectifs du dossier, dans la mesure où il ôterait à l'évaluation le caractère générique qui doit précisément être le sien.

Afin de prendre en compte la variabilité des propriétés des massifs granitiques français, trois modèles géologiques de site (« M1 », « M2 » et « M3 ») ont été établis en se fondant sur la synthèse des connaissances effectuée sur les granites français sous forme d'une typologie. Cette analyse typologique a permis d'identifier et de hiérarchiser les caractéristiques des granites dont la variabilité est la plus susceptible d'intervenir sur la conception d'un stockage.

Les modèles géologiques de site ont été élaborés en amont des modélisations hydrogéologiques et des simulations de transfert de radionucléides. Ils ont été décrits avec suffisamment de précision pour assurer leur propre cohérence géologique et refléter avec un certain réalisme des configurations représentatives du contexte géologique français. Ils s'inspirent notamment de configurations présentes dans le Massif Central et le Massif Armoricain. La construction des modèles ne vise pas à comparer des sites ni ne prétend représenter de façon exhaustive les configurations pouvant être rencontrées. Cela permet d'apprécier, à partir de dispositions réalistes, le rôle des différentes caractéristiques sur l'hydrogéologie et le transfert des radionucléides dans les analyses de sûreté.

Chaque modèle traite ainsi :

- de dispositions morpho-structurales différentes, c'est-à-dire des relations entre le massif granitique, la topographie de surface et les autres terrains encaissants les massifs granitiques,
- d'organisations de fracturation différentes, tant pour la petite fracturation qui intervient à l'échelle des ouvrages de stockage que pour la grande fracturation traitée à l'échelle du massif,
- de natures de granite différentes du point de vue lithologique et minéralogique.

Les calculs ont principalement porté sur les modèles de site M1 et M2.

Les principales caractéristiques géologiques des trois modèles de site**• Modèle de site « M1 »**

- un massif granitique d'âge hercynien, de grande surface (plusieurs milliers de km²), de topographie relativement contrastée et ayant une disposition morpho-structurale en « dôme » favorable à de longs temps de transfert hydraulique entre la profondeur et la surface,
- une organisation de la fracturation représentative d'une tectonique affectée par l'orogénèse alpine,
- une nature de granite dont la minéralogie, « moyenne », n'est pas particulièrement favorable à un colmatage des fractures par des minéraux hydrothermaux.

• Modèle de site « M2 »

- un massif granitique d'âge hercynien, de petite surface (centaine de km²), de topographie assez peu contrastée et ayant une disposition morpho-structurale en « dépression » peu favorable à de longs temps de transfert hydraulique entre la profondeur et la surface,
- une organisation de la fracturation représentative de la fracturation d'un granite hercynien, modérément affecté par les tectoniques pyrénéenne et alpine,
- une nature de granite dont la minéralogie est favorable au colmatage des fractures par des minéraux hydrothermaux.

• Modèle de site « M3 »

- un massif granitique cadomien, de surface moyenne (quelques centaines de km²), de topographie assez peu contrastée et ayant une disposition morpho-structurale en « plan incliné » moyennement favorable à de longs temps de transfert hydraulique entre la profondeur et la surface,
- une organisation de la fracturation représentative de la fracturation d'un granite cadomien affecté par la tectonique hercynienne et modérément affecté par les tectoniques pyrénéenne et alpine,
- une nature de granite dont la minéralogie, « moyenne », n'est pas particulièrement favorable à un colmatage des fractures par des minéraux hydrothermaux.

Les paramètres hydrauliques et de transport de la fracturation sont fixés d'une part à partir des données déjà acquises en France, en particulier sur le site de la Vienne (1994-1996) étudié par l'Andra ou le site d'Auriat (Creuse) étudié par le CEA (1980-1981), et d'autre part sur la base d'une comparaison des caractéristiques géologiques de la fracturation des différents modèles de site. Les nombreuses données étrangères disponibles (Suède, Finlande, Suisse, Canada) contribuent également à vérifier la pertinence des valeurs des paramètres retenues dans les modélisations.

La sensibilité des modèles hydrogéologiques et des simulations de transfert de radionucléides aux paramètres hydrauliques et de transport des fractures a été testée sur chacun des modèles géologiques de site.

• Des « valeurs tests » des paramètres du milieu granitique

Des simplifications dans les modèles géologiques ont été introduites aux étapes successives de modélisations hydrogéologiques effectuées à différentes échelles (régionale, massif, stockage et modules de stockage). Elles se sont accompagnées du choix des paramètres hydrauliques et de transport à introduire. Des gammes de valeurs ont été considérées tant pour la variabilité de ces paramètres pour chacun des modèles géologiques de site que pour les incertitudes liées notamment aux techniques de reconnaissance et de caractérisation du milieu fracturé.

Dans le contexte d'études génériques du milieu granitique, il n'est toutefois pas possible de définir le niveau de conservatisme des « valeurs tests » de paramètres ainsi retenues. Une telle définition ne prendrait son sens que par rapport à des travaux de reconnaissance et de caractérisation effectués sur un site spécifique. Cependant, un couple de valeurs des principaux paramètres hydrauliques et de transport du granite et des fractures a été testé dans le scénario d'évolution normale. Les calculs ont ainsi permis d'appréhender la sensibilité de la performance d'un stockage aux différents paramètres examinés et de disposer d'ordres de grandeur quant à la performance d'un stockage pour les différentes options de conception et modèles géologiques de site considérés.

• La modélisation des architectures

Les différents composants des architectures génériques de stockage prises en référence dans les évaluations de sûreté sont représentés au travers de leurs caractéristiques principales vis-à-vis du transport des radionucléides. Il s'agit notamment des propriétés hydrauliques et de transport des colis de stockage, des bouchons et des barrières ouvragées des alvéoles de stockage, des remblais et des scellements des galeries et des ouvrages d'accès. Pour chacun de ces composants, les connaissances acquises sur les matériaux et le retour d'expérience des analyses de sûreté effectuées à l'étranger ont permis de tester au moins deux modèles ou paramètres permettant de caractériser la variabilité possible. Les paramètres et modèles sont qualifiés (« phénoménologique », « conservatif » et « pénalisant ») en fonction du degré de conservatisme avec lequel ils couvrent les incertitudes.

Différents types de modèles et de valeurs

- **phénoménologique (aussi appelé « best estimate »)** : modèle jugé comme permettant d'obtenir, tout autre paramètre fixé par ailleurs, la meilleure adéquation entre les résultats du modèle et des résultats d'expérience ou d'observation. Ce choix est effectué *a priori*, indépendamment d'une référence à l'impact éventuel. Un modèle ou une valeur phénoménologique doit s'appuyer sur un nombre représentatif de mesures et un raisonnement physique montrant que cette valeur est la plus représentative en se fondant sur des informations fiables.
- **conservatif** : modèle qui permet d'obtenir un impact calculé qui se situe dans une gamme de valeurs hautes (tout autre paramètre étant fixé par ailleurs). Dans le cas le plus simple, où l'impact varie de manière croissante (respectivement décroissante) lorsque la valeur du paramètre croît, on choisit une valeur dans la plage haute (respectivement basse) des valeurs disponibles. En l'absence de mesures, on s'appuie sur les données disponibles à l'international, dès lors qu'elles sont suffisamment explicites dans la littérature et transposables au cas traité.
- **pénalisant** : modèle ne se référant pas à un état des connaissances phénoménologiques, mais étant choisi de manière conventionnelle comme conduisant de manière certaine à un impact supérieur à ceux qui seraient calculés avec des valeurs possibles. Cela peut par exemple correspondre à une limite physique.

• La modélisation des transferts de radionucléides dans le granite : en « réseaux de fractures » et en « milieu poreux équivalent »

La modélisation du transfert de radionucléides dans des fractures d'un massif granitique implique des simplifications qui sont traitées de deux façons,

- des modèles en « réseaux de fractures » traitent explicitement les fractures. La simplification consiste à grouper les fractures par famille. Des lois statistiques distribuent leurs propriétés géologiques, hydrauliques et de transport dans le massif granitique,
- des modèles en « milieu poreux équivalent » proposent un niveau de simplification supérieur. Les fractures ne sont pas modélisées explicitement, mais des paramètres hydrauliques « équivalents » sont attribués au massif granitique ou à certaines parties du massif pour prendre implicitement en compte les fractures.

A l'échelle des ouvrages et de l'environnement immédiat du stockage, le granite est représenté à l'aide des modèles en « réseaux de fractures ». Ces modèles en réseaux de fractures ont impliqué l'application de lois statistiques de distribution des propriétés géologiques et hydrogéologiques de fractures à chacun des modèles de site traités.

A l'échelle d'un site et du massif granitique hôte d'un stockage, le milieu géologique est représenté à l'aide de modèles en milieu poreux équivalent. Pour chacun des trois modèles géologiques de site traités, les modélisations ont mobilisé des méthodes qui permettent d'assurer la continuité des différentes échelles de modélisation du granite et de sa fracturation.

2.1.3 Les outils de simulation et de calculs

Deux types d'outils de simulation ont été utilisés pour les calculs. Pour les simulations en « réseaux de fractures », les outils sont ceux mis en oeuvre à l'étranger pour les études sur le stockage géologique. Des

coopérations internationales, notamment autour du projet « Connectflow », traitent du développement de modèles emboîtés en « réseau de fractures » et en milieu poreux équivalent pour assurer la continuité des différentes échelles de modélisations à traiter dans les simulations de transfert. Pour les simulations en « milieu poreux équivalent », les outils utilisés sont les mêmes que ceux utilisés notamment en milieu argileux (tableau ci-après)

Modèles	Codes
Hydrogéologie et "particle tracking" en milieu poreux équivalent.	- Connectflow (composante NAMMU, modélisation 3D, éléments finis). - Geoan (modélisation 3D, différences finies). - Porflow (modélisation 3D, différences finies).
Hydrogéologie et "particle tracking" en réseaux de fractures.	- Connectflow (composante NAPSAC, modélisation 3D, éléments finis). - FracMan (génération des réseaux de fractures) et MAFIC (résolution hydraulique des réseaux, 3D, éléments finis).
Transport en milieu poreux équivalent.	- PROPER (composante COMP-23, modélisation en compartiments des barrières ouvragées, différences finies). - Goldsim (modélisation volumique des barrières ouvragées). - Porflow.
Transport en réseaux de fractures.	- PROPER (composante FARF-31, modélisation 1D concept "stream tube" 1D). - PathPipe (conversion de réseaux de tubes pour le transport) et Goldsim (modélisation en réseaux de tuyaux 1D).

Modélisation des phénomènes et codes numériques

2.2 Les modèles de sûreté associés

2.2.1 Données générales du modèle de sûreté

Les types de colis de déchets les plus représentatifs de chacune des catégories de colis (déchets B, déchets C et combustibles usés) ont été retenus comme référence pour les calculs d'impact :

- déchets B du type B2 (boues bitumées) et B5.2 (coques et embouts compactés), représentatifs à la fois du plus grand volume des déchets B, de deux types de déchets aux caractéristiques suffisamment distinctes (thermicité, radioactivité, composition chimique) et de deux modes de colisage,
- déchets C du type C2, représentatifs en inventaire radiologique de la plus grande partie des déchets C,
- combustibles usés du type CU2 (MOX), pour lesquels l'activité labile relâchée à l'arrivée de l'eau est, dans le cas d'une défaillance du conteneur en cuivre, la plus forte parmi les différents types de combustibles usés.

De façon similaire, les calculs ont porté sur les radionucléides les plus représentatifs de la performance d'un stockage vis-à-vis de la sûreté à long terme. Ce sont les radionucléides à vie longue et les plus mobiles :

- colis du type B2 : l'iode 129, le chlore 36, le césium 135, le technétium 99 et le sélénium 79,
- colis du type B5.2 : l'iode 129, le chlore 36, le césium 135, le technétium 99 et le molybdène 93,
- colis du type C2 : l'iode 129, le césium 135, le carbone 14, l'étain 126 et le sélénium 79,
- colis du type CU2 : l'iode 129, le césium 135, le carbone 14, l'étain 126 et le sélénium 79.

Par ailleurs, une chaîne d'actinides (thorium 229, uranium 233, neptunium 237, américium 241, plutonium 241, curium 245) a été traitée à des fins méthodologiques pour une partie des colis de déchets, en l'occurrence les colis B5.2 et les colis C2.

2.2.2 La représentation du stockage dans l'espace et le temps

Par conception, le stockage est constitué de plusieurs zones distinctes correspondant aux différents types de déchets. L'évaluation de l'impact d'un stockage impliquerait donc, dans le cas d'un site d'études particulier, de

définir l'architecture générale du stockage de façon spécifique à la configuration géologique du site investigué. Dans le contexte générique du *Dossier 2005 Granite*, ceci n'est pas possible. L'objet est plus généralement d'identifier, au travers des calculs et des analyses de sensibilité, les principaux facteurs intervenant sur les performances d'un stockage. Pour cela, le scénario traite de façon distincte le cas des différents types de déchets choisis : déchets B2 et B5.2, déchets C2 et combustibles usés CU2 (MOX). Les calculs s'effectuent à partir de la représentation d'un tunnel de stockage de déchets B (déchets B2 et B5.2) ou d'un module de déchets C2 ou de combustibles usés CU2 (MOX).

Dans cette perspective, il a été également retenu, dans chacun des modèles géologiques de site considérés, de fixer des mêmes emplacements pour les tunnels (déchets B) ou modules de stockage (déchets C et combustibles usés) considérés. Ceci contribue à discriminer plus simplement, dans l'analyse des performances d'un stockage dans le granite, les facteurs liés aux types de colis de ceux liés aux caractéristiques du milieu géologique

Le choix des emplacements n'a pas visé un ajustement précis de l'implantation d'un stockage aux caractéristiques des massifs granitiques des trois modèles géologiques. Ceci aurait été illusoire, compte tenu du caractère générique des données utilisées. Les emplacements ont été fixés à partir des modèles géologiques et hydrogéologiques régionaux établis pour chaque modèle de site en excluant la proximité de zones de failles importantes et des implantations manifestement non conformes du point de vue hydrogéologique aux préconisations de la Règle fondamentale de sûreté RFS III.2.f. (gradients hydrauliques forts, zones de décharges hydrauliques à l'aplomb du stockage...). Deux emplacements théoriques ont été retenus par modèle de site, ce qui permet d'analyser dans quelle mesure l'implantation intervient dans la sûreté à long terme du stockage.

Du point de vue temporel, les évaluations sont faites pour le cas d'un stockage après fermeture, à l'échelle d'une centaine d'années après le début de sa réalisation. Ceci ne présume pas de la durée d'une phase de réversibilité, par définition inconnue (séculaire à pluri-séculaire). Cette hypothèse fixe, arbitrairement, une référence commune pour tous les calculs. Compte tenu des faibles durées du transitoire de resaturation mentionné plus haut, le stockage est supposé resaturé dès cette date.

Vis-à-vis des évolutions géodynamiques d'un site sur le très long terme, les calculs ne prennent pas en compte les éventuelles modifications du contexte du massif granitique qui s'en déduiraient (par exemple, hydrogéologie). Outre le fait qu'elles seraient, dans le contexte géologique français, non significatives à l'échelle de plusieurs dizaines à centaines de milliers d'années, de telles modifications ne seraient justifiées que dans le cas d'un site spécifique, ce qui sort du cadre générique des études.

2.2.3 La représentation des déchets et du relâchement des radionucléides

• Les colis de déchets B

La représentation des colis est différente selon les deux types de déchets (B2 et B5.2) retenus pour les calculs.

Pour les déchets B2 (boues bitumées), le colis de stockage est supposé ne pas être étanche à l'eau dès la fermeture du stockage, ce qui est une hypothèse prudente. Le conteneur en béton qui n'a pas d'étanchéité impose toutefois un environnement chimique à pH élevé (entre 12,5 et 10) limitant les flux de certains radionucléides grâce à des phénomènes de précipitation et de sorption. La cinétique de relâchement est représentée par un modèle développé à partir d'une phénoménologie validée expérimentalement en laboratoire. Il est fondé sur la reprise d'eau par le bitume et sur un comportement des radionucléides assimilés aux sels solubles de la matrice du bitume. On néglige dans ce modèle des phénomènes favorables comme l'insolubilisation dont les radionucléides ont fait l'objet lors du traitement initial du déchet. Le taux de relâchement proposé conduit, à 10 000 ans, à un relâchement de 90 % de la masse initiale contenue dans le bitume.

Pour les déchets B5.2, les calculs prennent en référence le cas d'un conteneur auquel sont allouées des propriétés de confinement complémentaire, c'est-à-dire un conteneur avec des propriétés hydrauliques qui limitent le relâchement des radionucléides pendant 10 000 ans. L'inventaire radioactif contenu dans les gaines en zircaloy et les déchets de structure présente au contact de l'eau un relâchement qui est directement lié à la vitesse de corrosion, et qui conduit à un relâchement complet en 100 000 ans.

• Les colis de déchets C vitrifiés

Les déchets vitrifiés sont placés dans un surconteneur en acier noir d'une épaisseur de 55 mm. Cette épaisseur assure, en prenant en compte la variabilité de configuration de sites granitiques en France (notamment du point de vue de la composition chimique des eaux), une étanchéité de plusieurs milliers d'années pendant lesquels

aucun relâchement ne peut s'opérer. De façon exploratoire, les calculs ont été réalisés avec la même hypothèse prudente d'un relâchement débutant après 1 000 ans pour les différents modèles de site.

La conception du surconteneur se caractérise par une grande robustesse vis-à-vis de possibles défauts de fabrication. On a néanmoins retenu de manière prudente la possibilité d'un tel défaut dans le calcul. Au stade actuel des études, sa définition revêt un caractère arbitraire. Une fraction de colis défectueux d'environ 1/10 000 du nombre total de conteneurs est ainsi prise comme hypothèse, soit un colis pour l'inventaire de déchets C2 qui constitue la base des calculs. Le défaut s'exprime de manière conventionnelle un siècle environ après la fermeture du stockage. Il se traduit, dans les calculs, par une perte d'étanchéité totale, ce qui est pénalisant.

Concernant le verre lui-même, le relâchement des radionucléides s'initie dès la perte d'étanchéité du surconteneur. Pour les déchets C2 pris en références dans les calculs, le taux de relâchement répond à un modèle phénoménologique dit « $V_0S \rightarrow V_r$ » comprenant deux phases. Le modèle est d'abord fondé sur la vitesse de dissolution initiale du verre jusqu'à saturation en silice du milieu environnant. Puis, dans une seconde phase, la cinétique de dissolution décroît jusqu'à une vitesse résiduelle (V_r). Dans le cas des déchets C2, ceci conduit à une dissolution du verre sur une durée d'environ 300 000 ans.

• Les colis de combustibles usés

Le concept de stockage proposé reprend, dans ses dispositions, le choix d'un conteneur en cuivre du concept KBS-3 développé par SKB en Suède. Le conteneur en cuivre est conçu pour être étanche sur de longues durées. Sans modification externe importante du contexte géodynamique et peu envisageable dans le cadre géologique français, l'étanchéité est assurée pour la période concernée par les calculs, soit plusieurs centaines de milliers d'années.

Par prudence, le cas d'un défaut initial de conteneur est traité dans le scénario d'évolution normale selon une proportion de colis, arbitraire à ce stade des études, et fixé, de façon équivalente à des analyses effectuées en Suède, à un colis pour l'inventaire retenu de CU2 qui constitue la base des calculs. Le défaut est un trou de 5 mm² de surface au niveau de la soudure du couvercle du conteneur. L'eau qui pénètre dans le conteneur provoque la corrosion de l'insert en fonte du conteneur puis sa rupture au bout de 20 000 ans, date déterminée au vu de modélisations spécifiques menées par SKB en Suède. Ces deux temps de la perte d'étanchéité du conteneur en cuivre constituent deux phases successives du modèle.

Le modèle de relâchement est fonction de la localisation des radionucléides dans les assemblages. On distingue :

- un modèle de relâchement progressif des radionucléides contenus dans les composants métalliques. Le relâchement est supposé congruent, c'est-à-dire directement lié à la vitesse de corrosion des composants. Cela conduit à des taux de relâchement allant de $5 \cdot 10^{-6}$ /an pour les radionucléides contenus dans les gaines (les radionucléides contenus dans la zirconie en surface des gaines est considérée labile) à $2 \cdot 10^{-3}$ /an pour les radionucléides contenus dans les éléments de structures en inconel,
- un modèle de dissolution de la matrice de combustibles sous l'effet de la radiolyse (dit modèle radiolytique). Ce modèle de dissolution retenu dans le calcul de référence est un modèle conservatif, plus pénalisant que celui généralement retenu au plan international,
- une fraction supposée labile.

2.2.4 La représentation de la migration des radionucléides dans les alvéoles de stockage

Dans le cas des déchets B, les radionucléides migrent au travers du béton des colis jusqu'au granite en paroi des tunnels de stockage. Le régime de transfert est un régime mixte diffusion / convection. Le béton limite les flux de certains radionucléides par les phénomènes de précipitation et de sorption, phénomènes qui sont pris en compte dans les calculs.

La zone du granite endommagée par l'excavation en paroi des tunnels de stockage est explicitement prise en compte dans les calculs avec une épaisseur de 50 cm. Elle est interrompue par le scellement en entrée du tunnel.

Le scellement a pour fonction de freiner les flux d'eau qui pourrait le traverser. Il présente donc des propriétés qui limitent aussi le transfert de radionucléides. Les valeurs retenues pour les paramètres hydrauliques se fondent sur la perméabilité équivalente obtenue lors du test à l'échelle réelle d'un scellement à base d'argile lors de l'essai « TSX » mené en laboratoire souterrain au Canada, soit 10^{-11} m/s. Ce choix constitue une option prudente dans la mesure où il minore les performances envisageables suite à l'essai. La migration des radionucléides dans le scellement s'effectue sous forme dominante par diffusion.

La nature de l'argile du scellement conduit également à lui attribuer des performances de rétention chimique des éléments.

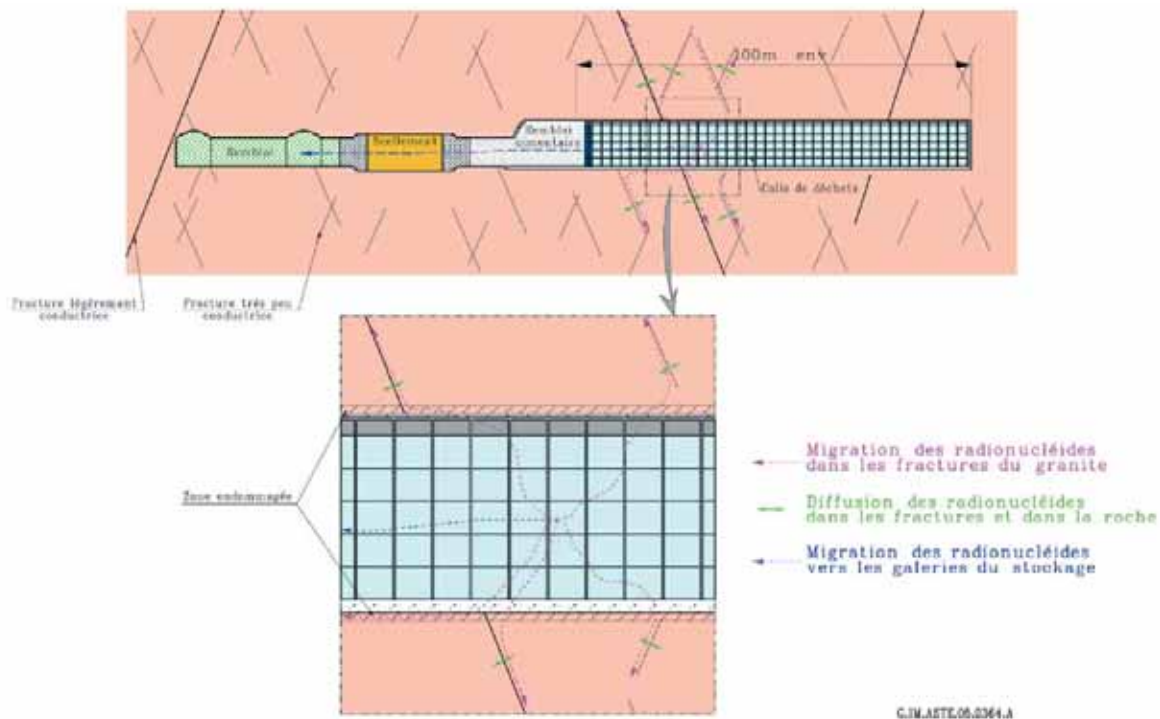


Schéma de la migration des radionucléides dans les tunnels de stockage de déchets B

Dans le cas des déchets C, et après perte d'étanchéité du surconteneur en acier, les radionucléides migrent au travers de la barrière ouvragée argileuse (de 60 cm d'épaisseur) vers le granite en paroi des puits de stockage. Le transfert se fait par diffusion du fait de la très faible perméabilité de la barrière ouvragée en argile gonflante. Les radionucléides migrent également pour partie et selon le même régime diffusif vers les galeries de manutention sus-jacentes au travers du bouchon d'alvéole constitué de la même argile gonflante (et d'épaisseur 1,50 m).

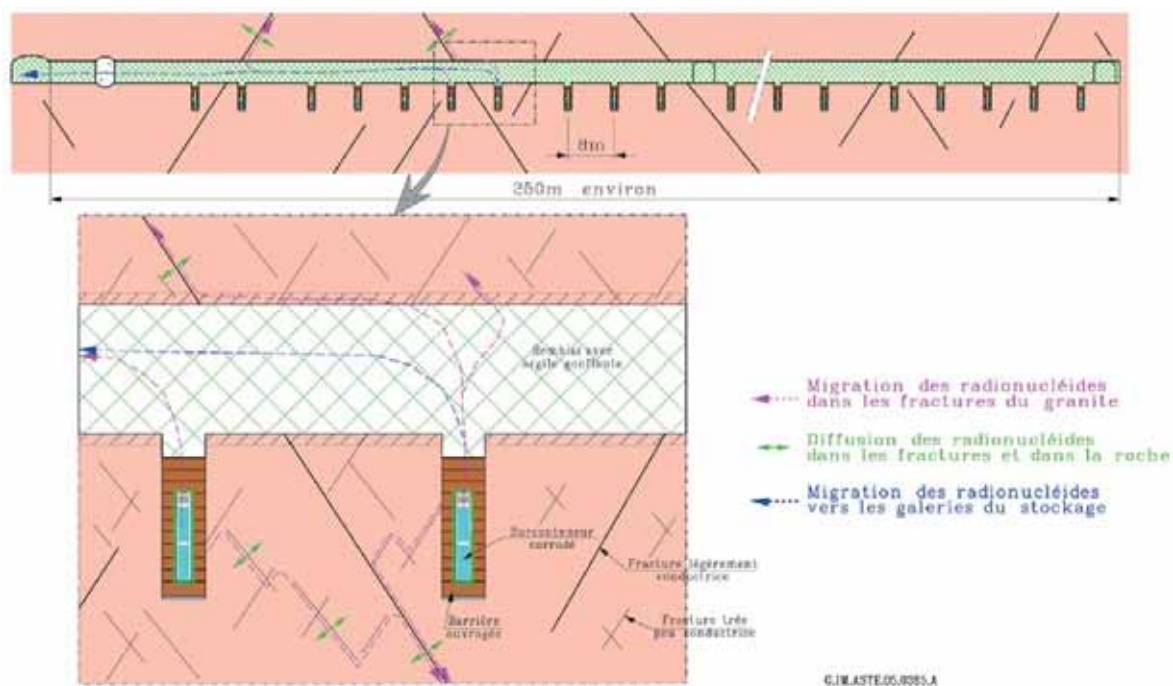


Schéma de la migration des radionucléides dans les puits de stockage de déchets C et les galeries de manutention

Dans le cas des combustibles usés, le schéma de migration des radionucléides est le même que dans le cas des déchets C. Il ne concerne, pour les combustibles usés, que le cas du conteneur défaillant pris en compte dans les calculs de sûreté.

2.2.5 La représentation de la migration des radionucléides dans les galeries et les ouvrages d'accès (puits, descenderie)

A la sortie des alvéoles, une fraction des éléments relâchés atteint les galeries remblayées du stockage et transite au travers de ces dernières avant de migrer vers les fractures du granite en paroi des galeries. Les remblais, composés de granite broyé et de bentonite, sont de faible perméabilité (10^{-10} m/s). La nature des remblais fait qu'il lui est également attribué des propriétés de rétention. Les valeurs des paramètres de rétention sont déterminées en fonction d'une proportion de 15 % d'argile gonflante.

La représentation des scellements des galeries est similaire à celle des bouchons des tunnels de stockage de déchets B. Les phénomènes hydrauliques et de transport pris en compte dans les calculs sont de même nature que les phénomènes mis en jeu dans les scellements des tunnels de stockage.

Pour un stockage en milieu granitique, la quantité de radionucléides parvenant aux ouvrages d'accès surface-fond (puits et descenderie) par les autres galeries du stockage est négligeable. En effet, les failles conductrices, recoupées par les galeries qui joignent les modules de stockage et les ouvrages d'accès, constituent des barrières hydrauliques à la migration des radionucléides. Aussi, les calculs font l'hypothèse que l'ensemble des radionucléides relâchés par les alvéoles d'un module migre vers le granite dans l'emprise du bloc de granite où est implanté le module.

2.2.6 La représentation de la migration des radionucléides dans le granite

La représentation de la migration des radionucléides dans le granite se fonde sur la détermination de cheminements hydrauliques dans le réseau des fractures du massif, hôte du stockage. Ces cheminements sont établis à partir des modèles hydrogéologiques à différentes échelles : à l'échelle régionale, soit à une dimension de plusieurs centaines de km^2 ; à l'échelle du stockage et de son environnement (également dénommée « champ lointain »), soit une dimension de la dizaine à quelques dizaines de km^2 ; à l'échelle du module de stockage (également dénommée « champ proche »), soit une dimension de l'ordre du km^2 ou d'une fraction de km^2 .

• A l'échelle du module de stockage

A l'échelle du module de stockage, les cheminements hydrauliques sont déterminés à partir de modèles en « réseaux de fractures » où les fractures de différentes dimensions sont explicitement représentées sur la base d'un traitement stochastique des données géologiques et hydrogéologiques. Les calculs de migration des radionucléides le long de ces cheminements font intervenir :

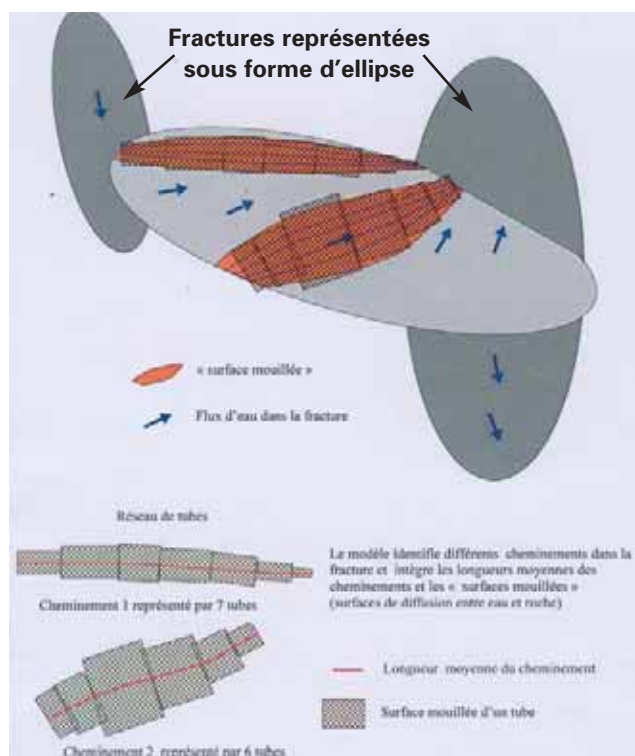
- des phénomènes de convection (et dispersion associée), principaux moteurs des mouvements d'eau,
- des phénomènes de diffusion des radionucléides dans la roche sur les plans des fractures (« épontes »),
- des phénomènes de rétention des radionucléides par sorption sur les minéraux des fractures et de la roche granitique elle-même.

La représentation de ces phénomènes dans la complexité d'un réseau de fractures implique des simplifications de la géométrie des cheminements et des surfaces d'échanges entre l'eau et les plans des fractures. Les modes de simplifications retenus se fondent sur les résultats des nombreuses expérimentations effectuées en laboratoires souterrains étrangers, notamment au travers du programme « TRUE » et des exercices de modélisations de la « Task force d'Äspö » menés en coopération internationale depuis une quinzaine d'années. Les paramètres de transport pour les calculs sont déterminés à partir des résultats de ces expérimentations en prenant en compte, au travers des différents modèles géologiques de site, la variabilité potentielle des caractéristiques de la minéralogie des fractures et des types de granite représentés. La variabilité concerne plus particulièrement la nature et l'intensité des colmatages naturels des fractures par des minéraux hydrothermaux ainsi que les propriétés de diffusion de la roche aux épontes des fractures.

Le cheminement des radionucléides dans un réseau de fractures : le modèle de tubes

Le modèle de « tubes », retenu de façon générale pour les simulations de transfert de radionucléides dans un réseau de fractures, repose sur le constat que les irrégularités de la géométrie d'une fracture et des connexions entre fractures entraînent des écoulements généralement chenalésés de l'eau dans les fractures (figure ci-dessous). Des tubes constituent une représentation simplifiée des chenalisations qui répond aux contraintes numériques des calculs.

Le flux d'eau des fractures passe, dans sa totalité, dans les tubes du modèle. Compte tenu de la faible cinétique des mouvements d'eau, les radionucléides migrent par diffusion dans la roche altérée en bordure des fractures : la surface de contact entre l'eau et le granite (« surface mouillée ») est un paramètre intervenant dans l'importance de la diffusion. Les coefficients de diffusion du granite sont généralement plus élevés en bordure des fractures que dans la roche saine, ce qui est un élément favorable à la rétention des radionucléides. Les paramètres de rétention sélectionnés pour les calculs prennent aussi en compte la minéralogie de la roche granitique en bordure des fractures.

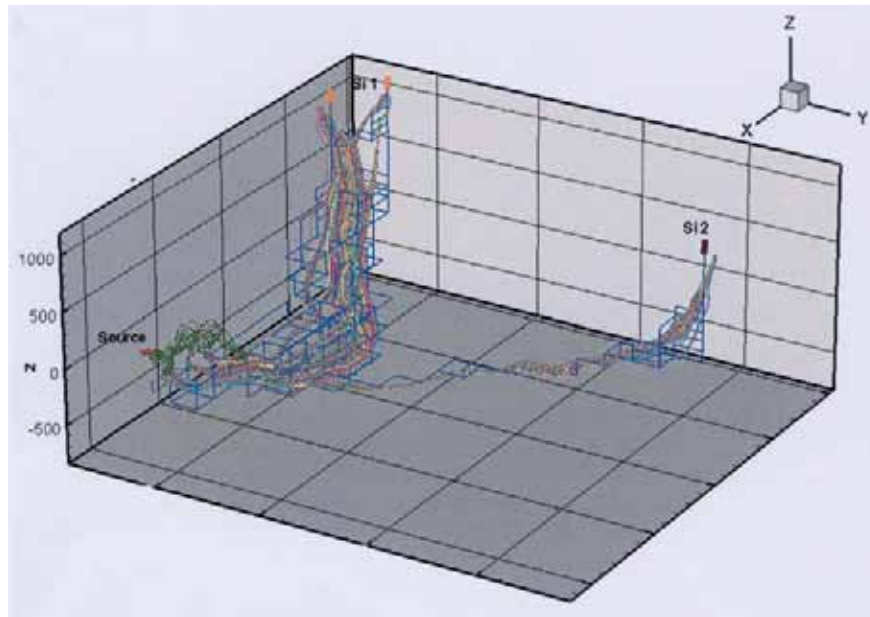


Modèle en tubes du cheminement de l'eau et des radionucléides dans une fracture

• A l'échelle du stockage et du milieu géologique

A l'échelle du stockage et du milieu géologique, les cheminements hydrauliques sont déterminés à partir de modèles assurant la continuité entre des représentations en « réseaux de fractures » et des représentations en milieu poreux équivalent à l'échelle régionale. Le long des cheminements hydrauliques, la représentation de la migration des radionucléides est similaire à celle faite à l'échelle du module de stockage.

La migration des radionucléides est représentée jusqu'à proximité de la surface du granite. Les quantités de radionucléides sont évaluées à leur entrée dans la partie superficielle du granite altérée (soit environ une centaine de mètres sous la surface). Ce choix permet de s'affranchir, dans des évaluations génériques, des incertitudes relatives à l'environnement de surface et spécifiques d'un site.



Calculs de performance d'un stockage en milieu granitique : modèle de cheminements par « tubes » de radionucléides entre le stockage (source) et des exutoires (Si1 et Si2)

2.3 Calculs de performances : résultats et enseignements méthodologiques

Les calculs qui ont été conduits ne visent pas à évaluer l'impact du stockage sur un site particulier, dans la mesure où les données nécessaires pour procéder à cette analyse ne sont pas accessibles. L'approche a consisté à s'intéresser à des indicateurs qui traduisent les performances des fonctions de sûreté. Ces indicateurs ne peuvent être directement comparés à des références réglementaires, à des normes ou à des recommandations de l'Autorité de sûreté nucléaire. Ils ne peuvent pas non plus être utilisés pour comparer les modèles de site entre eux, ce qui n'est d'ailleurs pas l'objet du calcul. En effet, si un site présente des caractéristiques moins favorables au regard d'une fonction de sûreté donnée, il n'est pas pour autant disqualifié du point de vue de la sûreté d'ensemble du stockage, qui combine les différentes fonctions au sein d'un système.

En revanche, on peut retirer de l'analyse des calculs, pour chaque configuration de site et de manière plus globale, les informations suivantes :

- les caractéristiques des massifs granitiques qui influencent le plus la performance des fonctions de sûreté, soit dans l'absolu (c'est-à-dire sur l'ensemble des modèles de site) soit dans le cadre d'un contexte morphostructural spécifique (sur un modèle de site en particulier),
- la manière dont les éléments ouvragés complètent ou offrent une redondance par rapport aux performances de la seule formation-hôte.

Par ailleurs, l'utilisation de plusieurs types de méthodes (calculs en milieu poreux équivalent, calculs en réseaux de fractures – désignés dans la suite sous le vocable de « calcul DFN ») et l'appel à des logiciels différents apportent des enseignements utiles sur le type d'information qui serait accessible, en fonction des méthodes mises en œuvre, si on devait conduire une analyse sur un site réel.

La présentation des calculs s'effectue selon les trois fonctions de sûreté relatives au transfert par l'eau :

- s'opposer à la circulation d'eau dans le stockage,
- limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage,
- retarder et atténuer la migration des radionucléides.

On a traité, outre le scénario d'évolution normale (SEN) traduisant les performances des fonctions de sûreté dans un contexte correspondant à la phénoménologie la plus probable, des scénarios dits « d'évolution altérée » (SEA), correspondant à des situations de type accidentel. Ont ainsi été abordés des cas de défaillance en série de conteneurs de déchets, de défaillances de scellements, de mauvaise reconnaissance de la fracturation du

granite. Les SEA apportent des compléments d'information sur les fonctions de sûreté. Ils mettent en évidence plus complètement que le seul SEN l'importance de chaque composant, en montrant les conséquences d'une perte de fonctionnalité de chacun d'entre eux. Ils permettent de vérifier également que le stockage reste robuste face à des défaillances, même improbables.

Les résultats des SEA sont donc présentés conjointement avec ceux du SEN, afin de compléter les informations au fil de la lecture.

2.3.1 Enseignements relatifs à la fonction « s'opposer à la circulation d'eau dans le stockage »

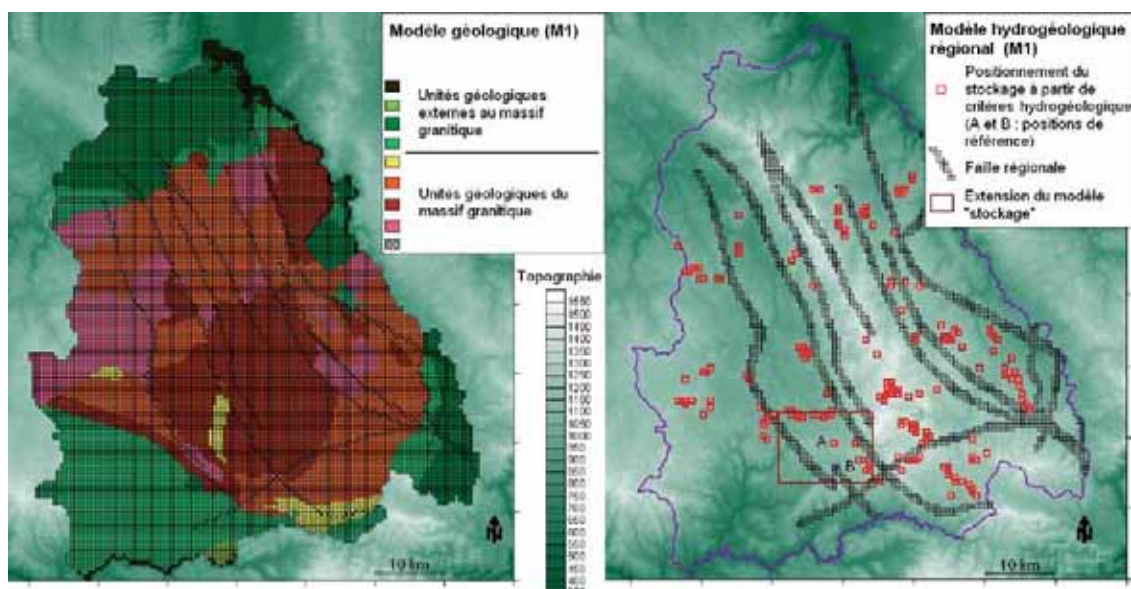
• Positionnement d'un stockage à l'échelle du massif

La fonction a pour objectif de limiter les flux d'eau dans les ouvrages de stockage, qui peuvent à la fois altérer les matériaux du stockage et entraîner les radionucléides vers l'environnement.

L'adaptation du stockage aux différentes échelles de fracturation permet de remplir cet objectif. Pour apprécier comment un massif pourrait accueillir un stockage dans un massif, une première étape serait de déterminer les emplacements adéquats du point de vue de l'hydrogéologie. Sur les différents modèles de site objets du calcul, on a ainsi déterminé des emplacements possibles sur la base des modèles hydrogéologiques à l'échelle régionale qui ont été construits.

La représentation du massif s'appuie sur la modélisation, qui comprend des données géologiques, les grandes failles régionales, la topographie (zones de recharges, points bas hydrauliques) et la perméabilité en grand du granite. Celle-ci est évaluée par les logiciels en engendrant des fractures sur une base aléatoire, tout en les contraignant à respecter les caractéristiques imposées par la géologie. La transmissivité des fractures évolue avec la profondeur selon des lois qui découlent d'observations sur des massifs français et étrangers.

Ce modèle sert de support au calcul des trajectoires hydrauliques entre le stockage et les exutoires naturels potentiels, en fonction de différentes localisations possibles. On peut ainsi proposer des positionnements pour un stockage, en fonction de critères définis par le concepteur : il est par exemple loisible de privilégier des positions conduisant à des cheminements hydrauliques longs, ou à des temps de transfert lents, ou à des débits d'eau faibles. Les choix finaux prennent également en compte les critères de la RFS III.2.f, tels que le respect d'une distance minimale vis-à-vis des grandes failles.



Modèle de site M1 : cadre géologique et hydrogéologique
Positionnements possibles d'un stockage à l'échelle du massif

Sur l'exemple du modèle de site M1, les calculs réalisés montrent que les cheminements hydrauliques peuvent avoir des distances sensiblement différentes d'une position à l'autre, ou selon les choix de cheminements (de 500 mètres pour les plus courts à plus de 10 km pour les plus longs). Le « positionnement du stockage » au sein du massif permet de privilégier des chemins hydrauliques longs et des débits faibles. Cela a conduit à retenir deux positions pour les calculs.

Ces techniques pourraient être mises en oeuvre pour identifier une zone d'intérêt pour un stockage au sein d'un massif.

• Positionnement des modules de stockage

Lors de la réalisation d'un stockage dans un massif granitique, la démarche de reconnaissance vise à déterminer l'implantation des modules de stockage. Cette démarche prévoit notamment que le positionnement des modules et des alvéoles de stockage soit fixé pendant les travaux de construction du stockage sur la base d'une caractérisation précise des lieux d'implantation. Dans les calculs génériques menés, le positionnement des modules de stockage ne peut être optimisé comme il le serait dans le cadre d'une démarche complète de reconnaissance d'un site. Un ajustement statistique a été réalisé sur la base de l'extension des fractures du modèle de réseau de fractures (DFN) : pour les déchets B, la dimension maximum de fracture recoupée par les tunnels de stockage est, par convention, de 80 m, et de 300 m pour les modules de déchets C. Il s'agit là d'une approche pénalisante, s'apparentant pour certains calculs (notamment pour les déchets C) à une situation de défaut de caractérisation, dans la mesure où, en situation réelle, le stockage serait progressivement adapté de manière à tirer le meilleur parti des blocs de granite sains disponibles. Les résultats présentés dans la suite sont donc à pondérer du fait que les emplacements de modules de stockage, distribués aléatoirement, ne relèvent pas d'une telle optimisation. L'analyse est toutefois indicatrice des questions qui sous-tendraient les travaux de caractérisation et de reconnaissance d'un site avant et pendant le stockage.

• Régime de transport au sein des ouvrages de stockage

Un indicateur qui permet d'obtenir une bonne idée du régime hydraulique au sein des ouvrages de stockage est le nombre adimensionnel de Péclet, rapport entre les temps caractéristiques de diffusion et de convection. Pour des valeurs faibles (et en particulier inférieures à 1), le régime hydraulique est dominé par la diffusion. Cet indicateur exprime le rapport entre convection et diffusion mais ne permet cependant pas de juger dans l'absolu de la vitesse avec laquelle se fait chaque type de transport. Pour cela, les vitesses de Darcy (permettant de juger de la rapidité avec laquelle s'effectuent les transferts d'eau) permettent de porter une appréciation sur la rapidité des circulations d'eau.

Définition du nombre de Péclet

$$Pe = (T_d/T_c)$$

avec :

$$T_d = L^2\omega/De$$

$$T_c = L\omega/(K.gradH).$$

et :

T_d , le temps caractéristique de migration par diffusion [an],

T_c , le temps caractéristique de migration par convection [an],

L , la distance de migration [m],

ω , la porosité totale dans le remblai de galerie [-],

De , le coefficient de diffusion effectif dans le remblai [m²/an],

K , la perméabilité du remblai [m/an],

$GradH$, le gradient de charges [m/m] dans la galerie, déduit des simulations en milieu homogène.

Dans les galeries, le régime de transfert est essentiellement déterminé par la perméabilité des remblais, la transmissivité des fractures du granite en paroi et le gradient. L'obtention d'un régime diffusif dans les galeries de stockage apparaît possible (tableau ci-après) mais dépend de la perméabilité du remblai. Un défaut de la mise en place du remblai dégradant sa perméabilité d'un ordre de grandeur (10^{-9} m/s au lieu de 10^{-10} m/s) sur un tronçon de galeries affecte peu le régime de transfert. En revanche, si la perméabilité du remblai devait être plus significativement dégradée (autour de 10^{-8} m/s), le régime hydraulique au sein du stockage pourrait se trouver affecté. *La mise en place d'un tel remblai s'avère donc comme une disposition conceptuelle utile, mais dont les performances seraient à définir en fonction du régime hydraulique sur un site déterminé.*

	Granite champ proche		Galerie remblayée		
	Conductivité hydraulique (m/s)	Gradient de charge (m/m)	Conductivité hydraulique (m/s)	Nombre de Pécllet ($Pe=T_d/T_c$)	Régime de transfert galerie
Déchets B2 (calcul effectué dans 54 m de galerie de liaison entre deux scellements)	10^{-11}	10^{-3}	10^{-10}	0,039	diffusif
			10^{-9}	0,16	diffusif
			10^{-8}	0,39	diffusif
	10^{-11}	10^{-2}	10^{-10}	0,39	diffusif
			10^{-9}	1,6	mixte diff/conv
			10^{-8}	3,9	convectif
	10^{-10}	10^{-2}	10^{-10}	0,49	diffusif
			10^{-9}	3,8	convectif
			10^{-8}	14	convectif
Déchets C2 (calcul effectué dans 15 m de galerie de manutention entre l'alvéole de bord et le scellement)	10^{-11}	10^{-3}	10^{-10}	0,012	diffusif
			10^{-9}	0,099	diffusif
			10^{-8}	1,1	mixte diff/conv
	10^{-11}	10^{-2}	10^{-10}	0,11	diffusif
			10^{-9}	1,1	mixte diff/conv
			10^{-8}	12	convectif
	10^{-10}	10^{-2}	10^{-10}	0,13	diffusif
			10^{-9}	1,1	mixte diff/conv
			10^{-8}	10	convectif

Estimation du nombre de Pécllet dans les galeries remblayées (approche « milieu poreux équivalent »)

• **Robustesse de la fonction « s'opposer à la circulation d'eau »**

Il est important de vérifier si les performances de la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » sont robustes face à une défaillance, de quelque nature qu'elle soit.

Le scénario altéré « défaut de scellement et des bouchons d'alvéoles » envisage une situation consistant à ne pas interrompre, sur environ 5 centimètres d'épaisseur, la continuité de la zone endommagée du granite en paroi des ouvrages horizontaux. Il met en évidence le rôle des remblais qui ont une efficacité telle que le défaut de scellement ne modifie pas sensiblement le régime de transfert hydraulique dans les galeries. Dans un contexte générique, il est délicat de distinguer le rôle des scellements de celui des remblais. Il convient de noter que, dans le cadre de l'implantation d'un stockage dans un massif donné, les blocs sains seraient réservés en priorité pour l'implantation des alvéoles ; les galeries qui y conduisent pourraient en revanche recouper des structures conductrices en bordure de ces blocs.

Dans une telle configuration, sceller la galerie de part et d'autre de la fracture traversée pourrait s'avérer une disposition plus efficace que le seul remblai. En tout état de cause, dans le cadre d'une configuration de site réel, il serait possible de privilégier soit les scellements, soit le remblai en fonction de l'objectif recherché, et de distinguer le rôle des uns et des autres de manière plus nette qu'en configuration générique.

2.3.2 Enseignements relatifs à la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage »

Cette fonction recouvre l'ensemble des phénomènes physico-chimiques qui tendent à empêcher la mise en solution des radionucléides. Il s'agit à la fois :

- des conditions d'écoulement dans les alvéoles, qui favorisent la durabilité des déchets,
- de l'étanchéité des conteneurs métalliques, qui isolent les radionucléides de l'eau,
- des conditions chimiques, qui favorisent l'insolubilité des éléments chimiques.

• **Transport dans les alvéoles**

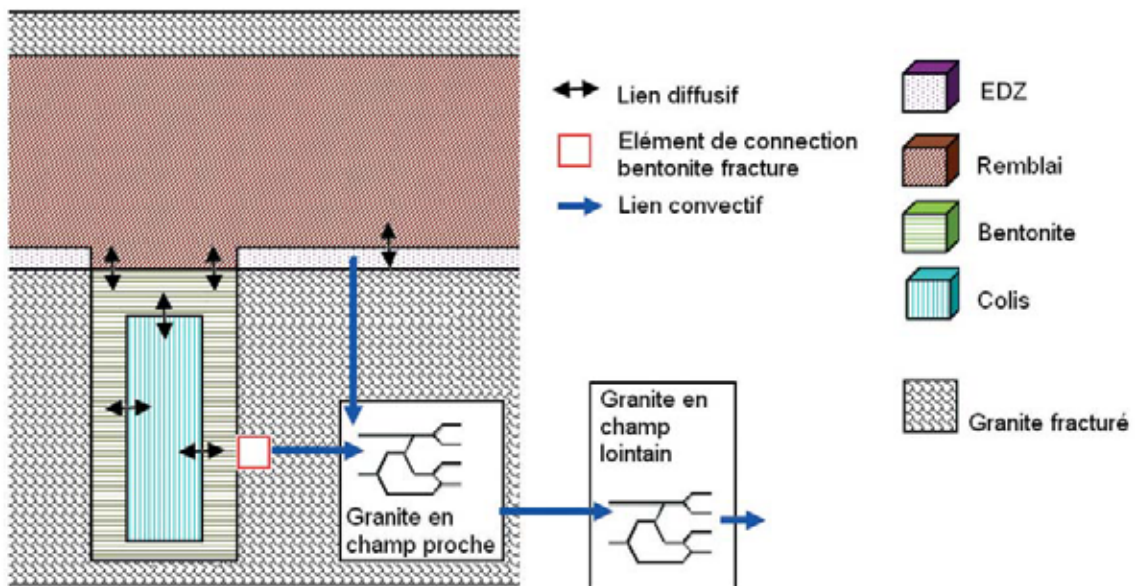
La fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » s'appuie sur l'établissement d'un régime diffusif au sein des alvéoles, particulièrement pour les déchets vitrifiés qui sont les plus sensibles aux conditions de transport à leur voisinage. En ce sens, les indicateurs tels que le nombre de Pécllet dans l'alvéole ne sont pas directement des indicateurs de performances de la fonction mais permettent de déterminer si celle-ci peut agir dans des conditions favorables. Les conditions diffusives au sein des alvéoles et le faible renouvellement de l'eau permettent de faire appel avec une meilleure confiance à des modèles de relâchement conduisant à des vitesses lentes.

Dans les alvéoles de déchets C et de combustibles usés, le nombre de Péclet montre que le régime est diffusif dans tous les cas (tableau ci-dessous). Les paramètres les plus influents contribuant à maintenir ce régime sont d'une part la présence de la barrière ouvragée, d'autre part la transmissivité des petites fractures sur le pourtour de l'alvéole. L'architecture « borgne » des tunnels de stockage contribue également à limiter les apports d'eau.

Estimation du nombre de Péclet dans la BO bentonite (déchet C2)	Granite champ proche		Barrière ouvragée bentonite		
	Conductivité hydraulique (m/s)	Gradient de charge imposé (m/m)	Gradient de charge induit (m/m)	Nombre de Péclet (anion) ($Pe = T_d/T_c$)	Régime de transfert dans la BO bentonite
Gradient horizontal (calcul effectué sur 0,60 m de bentonite dans la direction radiale)	10^{-11}	10^{-3}	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$\sim 0,0004$	diffusif
	10^{-10}	10^{-2}	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$\sim 0,008$	diffusif
Gradient vertical (calcul effectué sur 5,30 m de bentonite dans la direction verticale)	10^{-11}	10^{-3}	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$\sim 0,003$	diffusif
	10^{-10}	10^{-2}	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$\sim 0,033$	diffusif

Estimation du nombre de Péclet dans la bentonite des alvéoles de stockage de déchets C2, (approche « milieu poreux équivalent »)

Par rapport aux calculs en milieu poreux équivalent, qui ne permettent pas de discriminer les alvéoles les unes par rapport aux autres, les calculs en réseaux de fractures (DFN) mettent en évidence que, même si le régime reste diffusif à l'intérieur de l'alvéole dans tous les cas de figure, les situations peuvent être localement contrastées selon les fractures recoupées par les alvéoles.



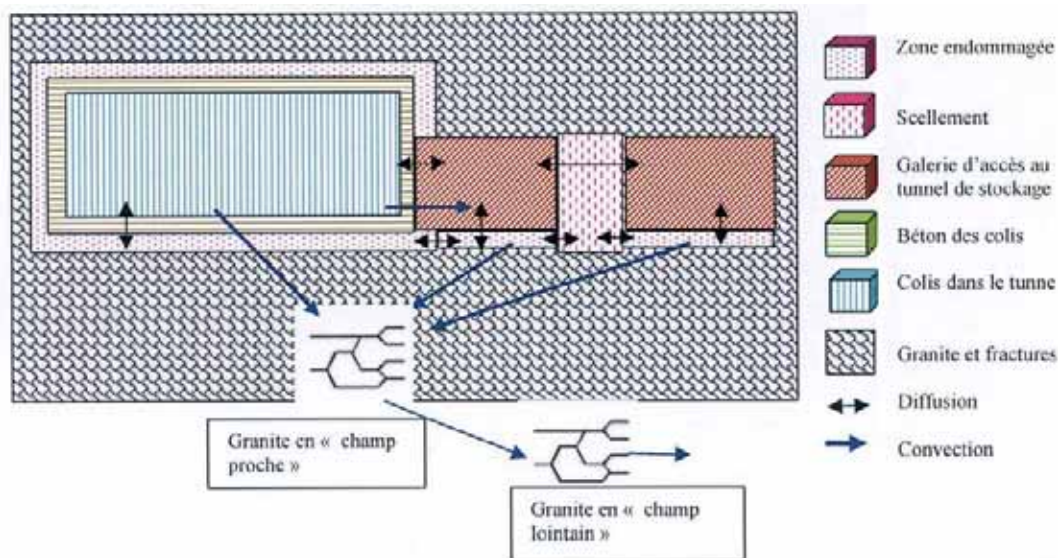
Modélisation des transferts dans une alvéole de stockage de déchets C (approche DFN dans le granite)

Ainsi, une exploitation des résultats obtenus sur le modèle de site M1 (modèle pour lequel les fractures du granite ont des transmissivités dans une gamme de valeurs relativement plutôt élevées) montre que sur dix implantations de puits de stockage de déchets C statistiquement représentatives :

- trois implantations d'alvéoles ne sont pas traversées par des flux d'eau car elles ne recoupent aucune fracture,
- quatre implantations correspondent à des flux inférieurs au litre par an,
- trois implantations correspondent à des flux supérieurs au litre par an (dizaine à quelques dizaines de litres par an).

Il convient de rappeler que ces résultats ne prennent pas en compte une optimisation du positionnement des alvéoles telle qu'elle pourrait être faite en sélectionnant les blocs de granite au sein desquels celles-ci seraient implantées. La fracturation étant engendrée de manière aléatoire dans le modèle, cela tend à amplifier le rôle de la barrière ouvragée. Dans le cadre d'une démarche d'installation de tunnels de stockage dans un massif réel, la reconnaissance des petites fractures et la sélection des blocs de granite les plus sains permettrait d'amoindrir l'importance de la barrière ouvragée. En tout état de cause, le calcul conduit montre que celle-ci constitue un dispositif efficace si le massif devait présenter une petite fracturation dense, ou en cas de situation de défaut de caractérisation. En effet, le régime demeure diffusif dans l'ensemble des configurations testées.

Dans les alvéoles de déchets B, le flux d'eau transitant dans les tunnels de stockage dépend principalement de la transmissivité des petites fractures dans le granite en paroi. L'implantation, par principe, des tunnels de stockage dans des blocs de granite très peu fracturés peut conduire à des cas où le granite est pratiquement imperméable : le régime de transfert est diffusif entre les tunnels de stockage et les galeries d'accès au travers du scellement en argile gonflante. Dans le cas de fractures légèrement conductrices, des faibles flux d'eau transitent dans le tunnel de stockage entre les fractures en paroi. Les flux évalués par les calculs en réseau de fractures (DFN) sont très faibles : de dizaines à centaines de litres par an pour des volumes de tunnels de stockage de l'ordre de 10 000 ou 20 000 m³.



Modèle du tunnel de stockage de déchets B et régimes de transfert (approche DFN dans le granite)

Les calculs représentent, de façon simplifiée, l'ensemble des empilements de colis sous la forme d'un ensemble homogène à la dimension des tunnels de stockage. L'enveloppe en béton est continue et en contact avec la zone endommagée du granite en paroi. Pour les colis en béton à capacité de confinement renforcé, les calculs prennent en compte une dégradation des colis à 10 000 ans représentée par une perte de leurs performances hydrauliques initiales (faible perméabilité – 1.10^{-13} m/s et faible porosité – 10 %). Les résultats des calculs montrent que les flux d'eau augmentent d'un facteur 5 après dégradation des colis, indiquant le rôle de frein hydraulique joué par les colis dans les tunnels de stockage.

Tunnels de déchets B5.2	Avant 10 000 ans	Après 10 000 ans
Flux d'eau dans les tunnels	30 l/an	150 l/an

Comparaison des flux d'eau dans les tunnels de stockage de déchets B5.2 avant 10 000 ans et après 10 000 ans (calculs en DFN pour le modèle de site M1, cas d'un granite doté d'une petite fracturation légèrement conductrice)

• Rôle des conteneurs

Un autre aspect de la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » est l'étanchéité offerte par les conteneurs métalliques. Les premières analyses conduites dans les calculs de performances envisagent à la fois des conteneurs performants et des conteneurs défaillants (un nombre limité en scénario d'évolution normale, une série plus importante en scénario d'évolution altérée). La comparaison des deux situations permet de porter une première appréciation sur l'intérêt de ce dispositif.

Pour les combustibles usés, le conteneur en cuivre présente une pérennité suffisante sur la durée de la démonstration de sûreté pour qu'il n'y ait pas de relâchement en situation normale. En situation de défaut de colis avec arrivée d'eau sur les assemblages au bout d'un siècle environ, les relâchements se produisent à mesure de la dissolution de la matrice. Celle-ci s'étend sur plusieurs milliers d'années (environ 5 000 ans) si l'on considère un modèle prudent de dissolution radiolytique. Avec un modèle de dissolution « classique » tel qu'il est adopté à l'international, les relâchements s'effectuent sur une durée jusqu'au-delà du million d'années. En cas de défaillance du conteneur CU, les radionucléides relâchés ne quittent pas toutefois immédiatement l'alvéole, car ils sont arrêtés ou freinés par la barrière ouvragée.

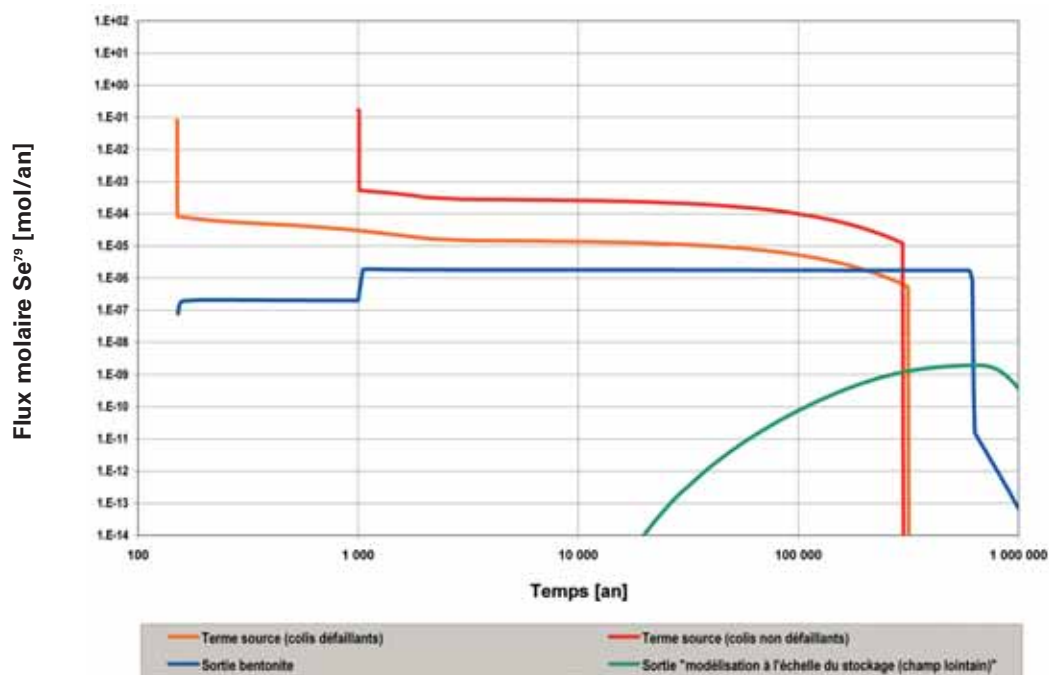
Pour les déchets C, l'analyse porte sur la comparaison de deux cas de figure : le cas d'un module de stockage où les surconteneurs perdent « normalement » leur étanchéité au bout de 1 000 ans et le cas d'un module de stockage où une fraction des surconteneurs (5 %) est défaillante au bout d'un siècle environ. Les calculs montrent, dans le cas d'une fraction de colis défaillants, l'arrivée plus rapide de radionucléides en sortie du champ proche dans le granite pendant une période de quelques milliers d'années. Au-delà, les flux molaires sont similaires dans les deux cas traités.

Il importe de rappeler également que, dans un contexte générique et compte tenu des données disponibles, il n'a pas été possible de représenter explicitement l'effet qu'aurait sur les paramètres de transport la prise en compte de températures significativement supérieures aux températures naturelles, telles que celles que pourraient rencontrer les radionucléides qui seraient relâchés par des conteneurs défaillants. La prise en compte de tels effets pourrait conduire à mettre mieux en évidence le rôle des surconteneurs métalliques pour les déchets C.

En conclusion, dans le contexte de calculs sur des modèles génériques où la répartition des puits de stockage n'est que partiellement ajustée à la fracturation, les conteneurs durables constituent une barrière utile pour suppléer au milieu géologique. En particulier, le conteneur en cuivre pérenne pour les combustibles usés constitue une option pertinente à ce stade vis-à-vis de l'adaptation à la fracturation. De même, le surconteneur pour les déchets C permet de gérer les incertitudes liées au transport des radionucléides en ambiance thermique. Dans un contexte générique, les conteneurs constituent en tout état de cause une disposition de conception prudente offrant une complémentarité par rapport aux barrières ouvragées et au milieu géologique.

• Précipitation dans les alvéoles

La fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage » se traduit aussi par la limitation de la mise en solution des radionucléides. Les calculs permettent, indirectement, de mesurer les effets de cette fonction en identifiant les radionucléides dont la migration est limitée par l'atteinte d'une limite de solubilité en champ proche. Compte tenu des concepts proposés par l'Andra, la sorption des éléments par l'argile gonflante (pour les radionucléides issus des alvéoles de déchets C ou de combustibles usés) et dans le béton (pour les déchets B) constitue généralement le facteur limitant de la migration de la plupart des radionucléides. Pour certains radionucléides faiblement sorbés, la limite de solubilité pilote cependant le transfert. C'est en particulier le cas du sélénium, dont le flux est atténué de plusieurs ordres de grandeur par la prise en compte de la solubilité.



Limitation des flux molaires par la solubilité – Exemple du sélénium dans le cas d'un module de déchets C2 (modèle de site M1 – approche DFN)

2.3.3 Enseignements sur la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides »

Les performances de cette fonction sont retraduites par des indicateurs d'atténuation (rapport entre la masse de radionucléides sortant d'un compartiment du stockage sur la masse qui y est entrée, rapport entre le débit maximal sortant d'un compartiment par rapport au débit maximal entrant) et de retard (différence entre le temps d'apparition du maximum de débit en sortie et en entrée d'un compartiment). Ces indicateurs peuvent être évalués en divers endroits :

- à la sortie des alvéoles de déchets B, ils permettent de juger, par comparaison avec la chronique de relâchement par les déchets, de l'intérêt d'attribuer des performances hydrauliques au colisage B, particulièrement en comparant le cas où ces colis ont des performances hydrauliques au cas où ces colis n'ont que des performances chimiques associées à un béton dégradé,
- à la sortie des barrières ouvragées des alvéoles de déchets C et de combustibles usés, ils permettent de juger de l'apport de ces éléments argileux, notamment au regard de celui de la formation-hôte,
- à la sortie du champ proche dans le massif granitique, ils permettent de juger des performances de la petite fracturation et des déterminants de ces performances,
- à la sortie du champ lointain dans le massif granitique, ils permettent de juger de la capacité d'atténuation globale du massif et des temps de transfert en son sein, ainsi que des caractéristiques qui influencent le plus ces performances.

• Retard et atténuation au niveau des alvéoles

Les performances de la fonction au niveau de l'alvéole sont directement le reflet des paramètres du modèle : la sorption dans le béton (pour les tunnels de déchets B) et dans l'argile gonflante (pour les autres alvéoles de stockage).

Dans le cas des déchets B, une illustration utile du rôle du conteneur en béton, dont on a déjà vu qu'il jouait un rôle dans la protection des déchets contre les flux d'eau, est la comparaison des relâchements en champ proche entre un conteneur béton non dégradé avec performances hydrauliques et le cas de conteneur n'ayant que des performances chimiques associées à un béton dégradé. Les calculs effectués en milieu poreux équivalent indiquent que le rôle du conteneur est plus net quand le granite en paroi des alvéoles est plus fracturé. Dans tous les cas (conteneur standard ou conteneur à confinement renforcé), les calculs en réseau de fractures (DFN) montrent que l'enveloppe en béton de déchets B a une influence nette sur la rétention de radionucléides très fortement sorbés, dans le béton (tels que les actinides) ou plus faiblement sorbés, comme le sélénium 79.

Pour les alvéoles de déchets C et de combustibles usés, les performances de retard et d'atténuation au niveau des alvéoles sont moins dépendantes de la fracturation locale, du fait de la présence de la barrière ouvragée en bentonite. Les radionucléides non sorbés diffusent au travers de cette dernière et migrent hors de l'alvéole en un million d'années. Les radionucléides sorbés par la bentonite comme les actinides, l'étain 126 ou, dans une moindre mesure, le césium 135 sont significativement retardés dans leur migration. Ainsi, pour le césium 135, les calculs relatifs au scénario d'un conteneur défaillant de combustibles usés montrent que le pourcentage de masse migrant hors de l'alvéole au travers de la barrière ouvragée argileuse n'est que d'environ 8 % au bout de 100 000 ans et de 16 % au bout d'un million d'années par rapport à leur masse initiale (calculs DFN-modèle de site M1).

• Retard et atténuation dans le granite

Plusieurs paramètres interviennent pour ralentir la migration des radionucléides dans les fractures du granite et en atténuer les flux :

- les propriétés hydrauliques des fractures et leur connectivité,
- les propriétés de rétention (sorption) des fractures et de la roche granitique en bordure des fractures,
- la disposition topographique et morpho-structurale des massifs granitiques, pour le champ lointain.

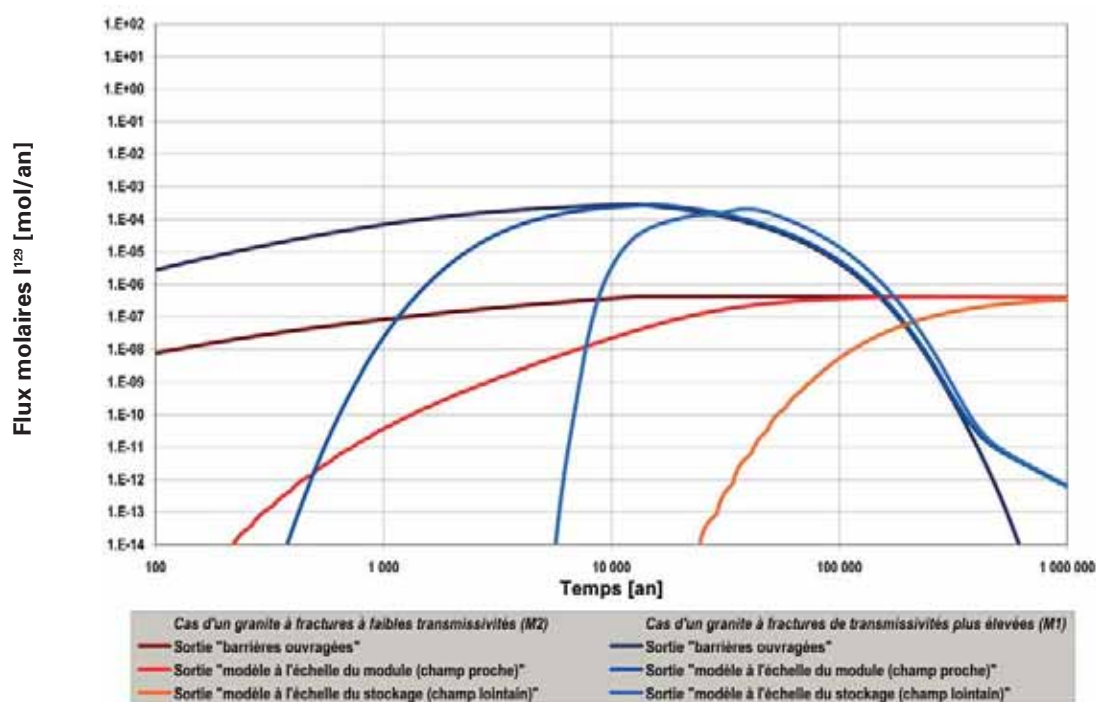
De ce fait, les radionucléides se distinguent selon deux grandes catégories :

- *les éléments non sorbés* (iode 129, chlore 36...). Le temps de transfert de ceux-ci par les fractures est directement le reflet de la longueur du chemin hydraulique qui mène à la surface. Pour ces radionucléides, la fonction « retarder et atténuer la migration » se distingue peu de la fonction « s'opposer à la circulation d'eau ». Leur migration est essentiellement dictée par la disposition topographique et morpho-structurale du massif – qui pilote le gradient et la longueur des cheminements – ainsi que par la transmissivité et la connectivité des fractures,
- *les éléments sensibles à la sorption* dans les épontes des fractures, qui peuvent connaître des retards significatifs ; la sorption peut ainsi leur donner le temps de décroître significativement dans les épontes des fractures, et ce dès le champ proche si leur période est suffisamment faible. Elle provoque un étalement du signal émis par le stockage dans le temps, et donc une diminution du maximum de débit de masse entre l'entrée du massif et la sortie.

1) Retard et atténuation dans le granite en champ proche : l'influence des propriétés hydrauliques des fractures

Les modèles de site représentent des configurations de fracturation différentes et représentatives de configurations géologiques dans le contexte français. La transmissivité des fractures dans le modèle de site M2 est moindre du fait de leur colmatage par des minéraux hydrothermaux que celle des fractures dans les modèles de sites M1 et M3. Pour des études génériques, les intersections de fractures transmissives entre elles sont supposées être systématiquement conductrices d'eau, ce qui est pénalisant pour beaucoup de configurations de massif granitique. Toutefois, la comparaison des calculs de flux de migration des radionucléides mobiles comme l'iode 129 entre les deux modèles de site M1 et M2 montre l'influence importante des propriétés hydrauliques des fractures en champ proche.

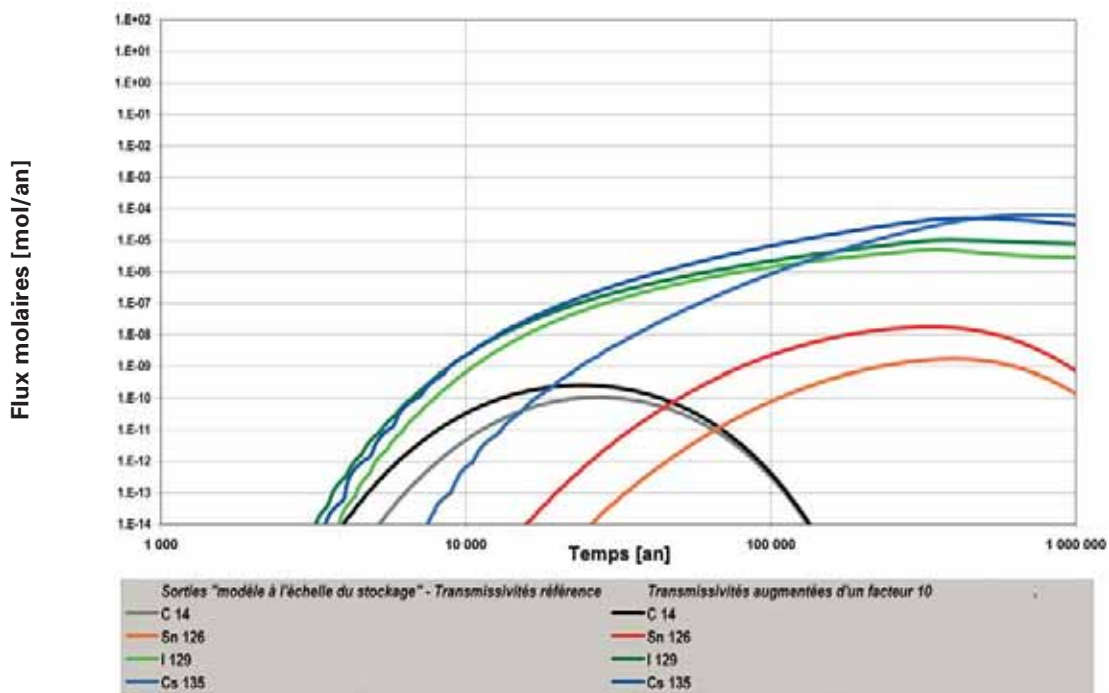
Le cas des déchets B est simple à illustrer du fait que les tunnels de stockage sont peu nombreux et implantés dans des blocs de granite peu fracturés. Les calculs sont conduits pour le cheminement de l'iode 129 le plus pénalisant entre le tunnel et les limites du modèle.



Migration de l'iode 129 dans les modèles de site M1 et M2 - Flux molaire pour une alvéole de déchets B2 (approche DFN)

Dans le cas d'un granite où les fractures sont de très faibles transmissivités en champ proche (modèle de site M2), les flux maximaux sont réduits et l'iode reste dans le granite en champ proche sur plusieurs centaines de milliers d'années. Dans le cas d'un granite où les fractures sont plus transmissives (modèle de site M1), le flux est plus élevé et l'inventaire total de l'iode 129 atteint les limites du modèle à l'échelle de la centaine de milliers d'années.

Dans le cas des déchets C et des combustibles usés, une variation de la transmissivité des fractures sur les performances d'un stockage entraîne, comme dans le cas des déchets B, des modifications des flux et des temps de migration des radionucléides. La multiplicité des cheminements des radionucléides correspondant aux différentes alvéoles d'un module fait que le bilan global est toutefois lissé par la variabilité des cheminements. Ainsi, l'influence des paramètres hydrauliques des fractures doit également être examinée avec les autres propriétés du granite, en particulier leur organisation géométrique qui détermine les cheminements. La sensibilité à la transmissivité des fractures peut être illustrée par l'évaluation des flux en sortie du modèle pour des valeurs de transmissivité variant d'un ordre de grandeur pour l'ensemble des fractures.



Sensibilité des performances à la transmissivité des fractures - Flux molaires pour un module de déchets C2, (modèle de site M2 – approche DFN)

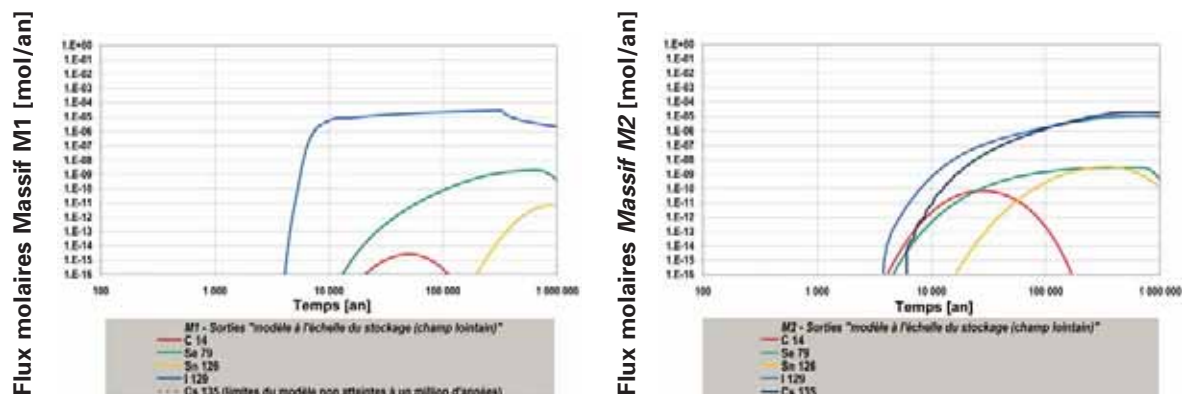
Dans le cas des radionucléides non sorbés comme l'iode 129, les transmissivités les plus fortes entraînent une légère augmentation générale des flux. Pour les radionucléides sorbés, l'augmentation des vitesses d'écoulement liées à celle des transmissivités entraîne en même temps une moindre intensité des phénomènes de diffusion et de sorption dans les fractures : par exemple le débit molaire du césium est augmenté de plusieurs ordres de grandeur à 10 000 ans et 100 000 ans ; le flux maximum est peu différent à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années.

2) Retard et atténuation dans le granite en champ lointain : l'influence des dispositions topographiques et morpho-structurales

De façon générale pour l'ensemble des dispositions de massifs granitiques examinées, de nombreux radionucléides sont sorbés lors de leur migration dans les fractures en champ proche ou en champ lointain. Ainsi, les calculs montrent que les actinides n'atteignent pas les limites du modèle en champ lointain au bout d'un million d'années, quelle que soit la configuration de massif granitique étudiée.

Les dispositions topographiques et morpho-structurales d'un massif granitique déterminent les longueurs de cheminements entre un stockage en profondeur et la surface. L'analyse des longueurs des cheminements hydrauliques pour les différents modèles géologiques de site considérés confirme des différences entre les configurations étudiées. L'analyse a été effectuée pour les deux cas les plus contrastés étudiés : modèle de site M1 représentatif d'une disposition en « dôme » et modèle de site M2 représentatif d'une disposition en « dépression ». Elle montre ainsi que, pour le modèle M1, les longueurs de cheminements varient, pour le plus grand nombre d'entre eux, entre 2 500 et 6 500 mètres. Pour le modèle « M2 », les longueurs de cheminements sont inférieures en moyenne, entre 1 500 à 4 000 mètres. Ces différences tendent à être lissées au niveau des transferts des radionucléides, car les caractéristiques du granite à l'échelle des modules de stockage limitent la migration de la plus grande partie des radionucléides, notamment ceux peu mobiles. Pour les radionucléides mobiles à vie longue, en particulier chlore 36 et iode 129, les temps de transferts hydrauliques déterminent directement les temps de migration.

Les graphes ci-après illustrent, dans le cas des déchets vitrifiés C2, les radionucléides qui atteignent les limites du modèle dans le cas du modèle de site M1. Seuls les radionucléides peu sorbés sont présents (on notera que le chlore 36, relativement peu présent dans les verres, n'a pas été retenu pour le calcul). En particulier le césium 135 n'atteint pas les limites du modèle à l'échelle de 1 million d'années et reste dans le massif. Ce n'est pas le cas pour le modèle de site M2, traduction directe de temps de cheminements plus courts.



Atténuation des flux de radionucléides pour les modèles de sites M1 et M2 – Flux molaire pour un module de déchets C2 (approche DFN)

• Robustesse du stockage à une éventuelle erreur de caractérisation

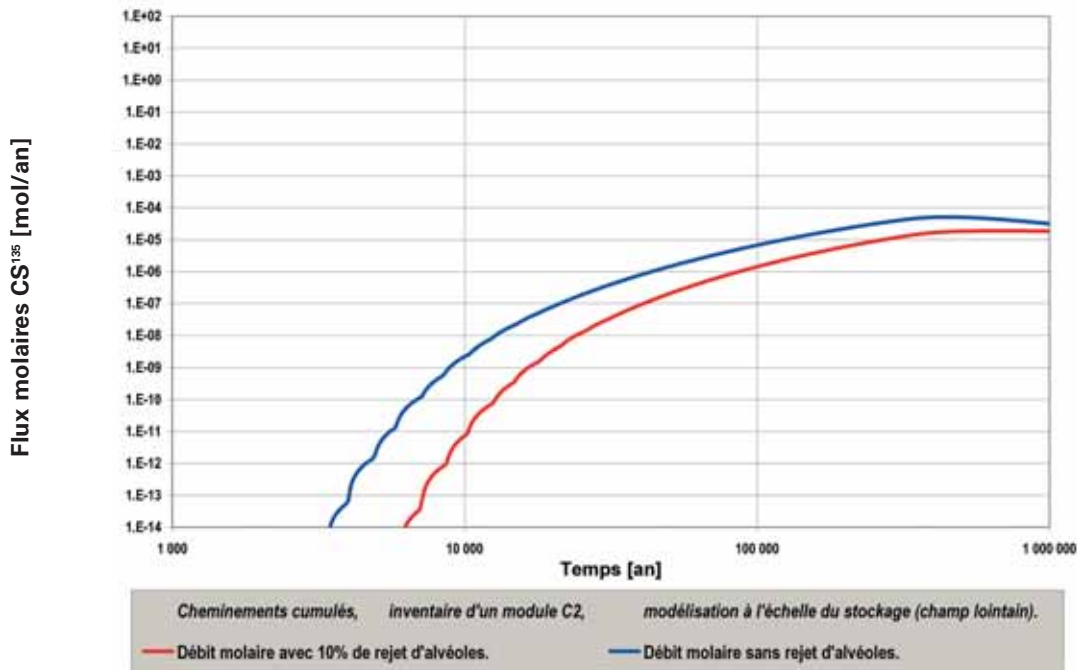
Le scénario altéré « défaut de caractérisation » permet d'illustrer l'importance d'une caractérisation plus ou moins fine de la fracturation. L'adaptation de l'architecture d'un stockage à la fracturation d'un granite est soumise à des opérations de reconnaissance préalables aux diverses étapes de reconnaissance du site. Une étape particulièrement importante est la caractérisation de la fracturation effectuée, *in situ*, dans le stockage avant le creusement des alvéoles et la mise en place des colis.

Les conséquences d'un défaut de caractérisation peuvent être analysées en comparant un scénario d'évolution normale, dans lequel cette caractérisation est correctement effectuée, et un scénario « défaut de caractérisation » qui considère la non identification de fractures qui auraient dû être évitées.

Dans le cas des déchets C, 10 % des positions d'implantation possibles des alvéoles ont été écartées dans le cas du scénario d'évolution normale : ces positions correspondent aux conditions hydrauliques en champ proche les plus défavorables. Pour le scénario de défaut de caractérisation au contraire, la totalité des positions possibles d'implantation pour les alvéoles est conservée.

Les transferts des radionucléides pour le module C2 sont calculés dans les deux cas en distribuant l'inventaire correspondant sur les cheminements possibles issus des alvéoles (rejet de 10 % dans le cas normal et non rejet dans le cas de défaut de caractérisation). La comparaison en termes de flux molaire est donnée à la figure ci-après.

Pour le césium 135, le non rejet des 10 % d'implantations d'alvéoles correspondant aux situations hydrauliquement les plus pénalisantes entraîne un débit molaire maximum augmenté d'un facteur 5 (après 400 000 ans). Le flux molaire est augmenté de deux ordres de grandeur à 10 000 ans, et d'un ordre de grandeur environ à 100 000 ans. Cela souligne l'importance de la caractérisation et son influence sur la performance globale du système. Sur un site particulier, il conviendrait de préciser plus avant l'influence d'un tri des implantations des alvéoles.



Comparaison des flux molaire avec et sans rejet de 10 % des alvéoles - Flux molaire en césium 135 d'un module de déchets C2, massif M2 (approche DFN)

Dans le cas des déchets B, et notamment des déchets B5.2, l'impact d'une mauvaise caractérisation locale serait relativement plus sensible en terme de quantités de radionucléides relâchés que dans le cas des déchets C. Ceci tient au nombre plus important de colis potentiellement concernés. Un défaut local de caractérisation de la petite fracturation concernée par l'implantation d'un tunnel de stockage ne remettrait cependant pas en cause les performances globales d'un stockage de déchets B5.2. En effet, le défaut de caractérisation ne serait sensible que dans le cas d'une erreur grossière de caractérisation impliquant la recoupe des tunnels de stockage par une fracture de grande extension (pluri-hectométrique) et significativement transmissive, ce qui n'est pas réaliste compte tenu de la stratégie de reconnaissance proposée et du faible nombre de tunnels à implanter.

Au total, même si la caractérisation de la fracturation et l'adaptation du stockage en fonction de ses caractéristiques tant hydrauliques que de transport apparaît importante, le stockage est, au global, peu sensible à une erreur ponctuelle. En effet, du fait du fractionnement (modules, alvéoles), une erreur de caractérisation n'affecterait qu'une part modeste de l'inventaire des colis stockés.

2.4 Conclusion des calculs

Dans un contexte générique, les calculs conduits ne peuvent prétendre être conclusifs, ni sur la satisfaction des objectifs de sûreté, ni sur les performances des fonctions de sûreté que remplit chaque composant. Pour autant, la réalisation des calculs apporte une moisson d'informations importantes, à la fois du point de vue méthodologique et du point de vue des grands déterminants qui conditionnent la sûreté du stockage.

Du point de vue des méthodes, l'utilisation d'outils de calculs à la fois « classiques » (tels que ceux conduits dans un milieu homogène) et plus spécifiques du granite (les calculs en milieu fracturé) souligne la complémentarité des deux approches. Les premiers outils permettent de déterminer de manière simple l'influence des principaux paramètres macroscopiques : gradient hydraulique, perméabilité en grand de la roche et des ouvrages, nombre de Pécllet, etc. Les calculs en milieu fracturé donnent accès à une information plus riche, permettant de relier les performances du champ proche à la structuration et à la répartition de la petite fracturation, ou d'établir un lien entre fracturation moyenne et perméabilité en grand. Ces informations seraient à exploiter, dans l'hypothèse d'une reconnaissance de site, pour déterminer au fur et à mesure des analyses de sûreté les critères pertinents pour l'implantation et l'architecture du stockage.

La reconnaissance de la fracturation et la bonne caractérisation de ses propriétés hydrauliques s'avèrent importantes pour maîtriser les écoulements dans et autour du stockage. A l'échelle des modules de stockage, elles conduisent à des implantations à l'abri de la fracturation moyenne, là où elle est trop conductrice d'eau.

Au niveau des alvéoles, l'adaptation de l'implantation des alvéoles à la petite fracturation offre une opportunité supplémentaire de limiter les écoulements et de favoriser des cheminements longs des radionucléides. Pour autant, de par leur fractionnement important, les modules de stockage de déchets vitrifiés et de combustibles usés s'avèrent peu sensibles à des défauts de caractérisation ponctuels. Les tunnels de stockage de déchets B, de taille plus importante, peuvent être plus sensibles à la qualité du bloc de granite dans lequel ils seraient installés ; un défaut de caractérisation pourrait affecter la performance du stockage dans le cas de la non-détection d'une fracture d'extension importante et de transmissivité significative. Ce cas paraît peu vraisemblable, dans le cadre de la démarche de reconnaissance proposée pour la caractérisation d'un massif granitique et compte tenu du nombre limité de tunnels.

Du point de vue des résultats, les calculs sur un site générique montrent la bonne complémentarité entre les propriétés des ouvrages et celles du milieu géologique. Dans l'état actuel des connaissances, les performances du remblai s'avèrent significatives du point de vue de la maîtrise des écoulements au sein du stockage, dans la mesure où le site lui-même offre une perméabilité maîtrisée et des gradients faibles. Les barrières ouvragées assurent un régime diffusif dans les alvéoles et immobilisent les radionucléides peu solubles. Les conteneurs de déchets B en béton participent à la fois à la limitation des flux d'eau et à la sorption des radionucléides. Les surconteneurs de déchets C retardent le relâchement des radionucléides dans les alvéoles. Les conteneurs en cuivre pour les combustibles usés permettent un confinement pérenne de la radioactivité et offrent de la souplesse, à ce stade d'études génériques, vis-à-vis de l'implantation du stockage et de la fracturation. La rétention dans les fractures du granite permet de limiter fortement le débit des radionucléides soumis à la sorption, et dans les configurations favorables, d'empêcher leur transfert jusqu'aux limites du modèle.

Bien que conduites sur des modèles de site générique, avec l'ensemble des réserves qui s'attachent à ce type d'exercice, les analyses de sûreté, à la fois l'analyse qualitative et les calculs, ne mettent pas en évidence d'élément qui disqualifierait le milieu granitique pour un stockage de déchets de haute activité et à vie longue.

Conclusion

La loi du 30 décembre 1991 a initié un processus de recherche sur différentes voies de gestion des déchets à haute activité et à vie longue. Dans ce cadre, l'Andra a conduit les travaux pour étudier la possibilité d'un stockage en formation géologique profonde, en considérant deux roches de nature différente, l'argile et le granite. Pour le milieu granitique, en l'absence de site désigné, le programme de recherches mis en œuvre a eu pour objectif d'évaluer l'intérêt de la roche pour un stockage profond. Dans cette perspective, les différentes problématiques relatives au stockage en milieu granitique ont été abordées. Des options génériques pour un stockage ont été proposées en lien avec les objectifs de sûreté poursuivis.

1. Une démarche d'étude générique des granites français adossée aux études et recherches menées à l'étranger sur le granite

Pour l'étude du milieu granitique, l'Andra s'est attachée à rassembler les différentes connaissances scientifiques disponibles pouvant servir de fondement à l'étude du stockage géologique. Cela a concerné à la fois les milieux granitiques tels que l'on peut les rencontrer sur le territoire national, mais également ceux étudiés à l'étranger par les homologues (SKB en Suède, Posiva en Finlande, Nagra en Suisse et AECL au Canada). Cette démarche a ainsi permis de disposer d'une vue globale sur les propriétés intrinsèques de la roche et de ses potentialités pour un stockage.

D'abord, l'Andra a valorisé l'ensemble des connaissances acquises sur les granites français, notamment au travers du retour d'expériences minières ou des travaux sur sites conduits au cours des dernières décennies. Pour cela, les données géologiques disponibles sur environ 78 zones granitiques de plus de 20 km² réparties sur le territoire national (dans le Massif Central et le Massif Armoricaïn) ont été collectées et analysées. Les caractères communs et la variabilité des propriétés des granites français ont pu ainsi être appréhendés.

Par ailleurs, l'Andra a mobilisé la communauté scientifique nationale sur les thématiques importantes pour le stockage, en particulier vis-à-vis de la compréhension de l'organisation de la fracturation des granites. Cela s'est traduit par des partenariats avec des organismes de recherche ainsi que par une politique de soutien à la formation par la recherche, sous la forme de bourses de thèse.

Les laboratoires à l'étranger ont constitué un apport très important, à la fois méthodologique mais également sur le plan des résultats scientifiques. L'Andra a très largement participé aux expérimentations dans les laboratoires souterrains au Canada (laboratoire du Lac du Bonnet), en Suisse (laboratoire du Grimsel) et en Suède (laboratoire d'Äspö). Elle a pu y mener des expériences en partenariat avec ses homologues. Cela a permis de confronter les études et les recherches, et de bien comprendre comment certains résultats obtenus dans ces laboratoires pouvaient être transposés au contexte des granites français. En particulier, les travaux de reconnaissance d'un bloc de granite et de modélisation associés des circulations dans les fractures dans le laboratoire d'Äspö ont étayé la compréhension des phénomènes en jeu. Les résultats obtenus sont très largement transposables aux massifs granitiques français. De même, l'essai de scellement réalisé dans le laboratoire du Lac du Bonnet a montré la possibilité de sceller efficacement un ouvrage dans le granite pour éviter les circulations d'eau. Enfin, l'Andra a participé, dans le cadre d'un partenariat avec Posiva, à des travaux de reconnaissance depuis la surface sur le site d'Olkiluoto, lui permettant de tester et de maîtriser différentes techniques.

Au global, les études et recherches menées par l'Andra s'appuient sur les nombreux travaux réalisés à l'étranger sur le stockage en milieu granitique. Notamment, les études de conception d'un stockage menées par l'Andra se fondent largement sur les acquis à l'étranger, notamment en Suède et en Finlande.

2. Un stockage dans le granite est envisageable

Évaluer l'intérêt du granite pour le stockage nécessite principalement d'examiner la possibilité de reconnaître et de comprendre l'organisation d'un massif granitique, d'étudier comment un stockage pourrait y être réalisé et d'apprécier si ce dernier peut protéger l'homme et l'environnement des déchets radioactifs qui y seraient placés. L'ensemble de ces différentes problématiques a été abordé. L'analyse souligne qu'il n'existe, à ce stade, pas d'obstacle rédhibitoire de principe.

• Il existe des méthodes pour reconnaître et caractériser un granite.

Les travaux conduits dans les laboratoires étrangers ou sur des sites à partir de la surface ont permis de tester, avec succès, différentes méthodes de caractérisation et de modélisation du granite et de sa fracturation, méthodes qu'il s'agirait de mobiliser dans le cadre de la reconnaissance d'un site.

Des méthodes existent pour reconnaître un massif granitique. Associées aux outils de modélisation modernes, elles permettent *a priori* de comprendre son organisation (agencement des blocs de granite, structuration des fractures...) et son fonctionnement du point de vue de la circulation des eaux en profondeur.

• Des architectures génériques sont proposées pour un stockage réversible en milieu granitique.

Les architectures d'un stockage doivent s'adapter aux caractéristiques du milieu géologique. D'une manière générale, le milieu granitique sain se caractérise notamment par la grande résistance mécanique et la très faible perméabilité de la roche. Il s'agit aussi d'un milieu qui contient très peu d'eau en profondeur. Les concepts génériques proposés exploitent ces propriétés communes à l'ensemble des granites et prennent par ailleurs en compte les spécificités des granites dans le contexte géologique français.

Toutefois, les fractures du milieu granitique en profondeur sont susceptibles d'être le lieu de lentes circulations d'eau. Les concepts proposés les évitent autant que possible par un ajustement architectural aux différentes échelles de la fracturation : les zones de stockage sont implantées à l'écart des failles principales du massif granitique et les cavités de stockage sont localement positionnées dans la roche saine très peu perméable afin de n'intercepter que des fractures peu ou pas conductrices. De manière complémentaire, la conception prévoit la mise en place de scellements et de remblais peu perméables qui protègent les cavités de stockage des lents mouvements d'eau qui pourraient s'y produire.

La conception d'un stockage inclut également celle de colisages de déchets pour chaque type de déchets (déchets B ou C) ou les combustibles usés. Des options sont proposées pour des colisages complémentaires des déchets B (en béton) ou des déchets C (en acier). Elles sont similaires à celles étudiées pour le milieu argileux, avec toutefois l'adoption d'un conteneur avec des propriétés accrues de confinement pour certains déchets B. Pour les combustibles usés, au cas où ces derniers ne seraient pas traités, il a été examiné l'intérêt du conteneurage en cuivre développé en Suède et en Finlande, qui assure un confinement sur de très longues durées.

Les architectures de stockage proposées pour le granite s'adaptent à la fracturation du milieu et tirent parti de la très faible perméabilité et de la résistance de la roche saine. Des dispositifs ouvragés viennent compléter les propriétés de la roche pour assurer le confinement de la radioactivité : ce sont les colisages complémentaires des déchets en surconteneurs, les scellements et remblaiements des ouvrages. En outre, de nombreuses études menées dans le cadre de l'étude du milieu argileux peuvent être transposées pour ce qui concerne la sûreté opérationnelle et la sécurité, qui montrent la possibilité d'une exploitation sûre et sans impact sur l'environnement, sur la base du retour d'expérience d'autres installations minières ou nucléaires.

• La réversibilité a été placée au cœur de la démarche d'étude et traduite concrètement en pratique.

Les architectures génériques proposées pour le stockage ont été sélectionnées en fonction de leur aptitude à permettre la réversibilité dans les meilleures conditions possibles. L'Andra a développé une approche concrète du stockage réversible qui dépasse la seule possibilité technologique de retirer les colis. Cette dernière, largement commune aux travaux sur le milieu argileux, peut être définie comme la possibilité d'un pilotage progressif et flexible du stockage par étapes. L'objectif est de laisser aux générations futures une liberté de décision pour la gestion des déchets. Aussi, l'Andra a retenu de ne pas fixer *a priori* de durée à la réversibilité. Il s'agit d'offrir une souplesse aussi grande que possible dans la gestion de chaque étape, en ménageant la possibilité d'un maintien en l'état avant de décider de passer à l'étape suivante ou de revenir en arrière. La conception du stockage (architecture modulaire, simplification de l'exploitation, dimensionnement et choix de matériaux durables, etc.) vise à laisser les choix les plus ouverts possible.

Le stockage réversible peut ainsi jouer un double rôle. Il peut être géré comme un entreposage avec la mise

en place des déchets et, si cela est souhaité, la reprise de ces derniers par une simple inversion du processus de stockage. Le maintien de cette réversibilité suppose évidemment l'intervention de l'homme, sans toutefois induire de contraintes excessives. Mais, point essentiel qui le démarque d'un simple entreposage, il inclut la possibilité d'être progressivement fermé, afin de pouvoir ensuite évoluer de manière sûre et passive sans aucune intervention humaine.

Le milieu géologique granitique et les concepts développés par l'Andra permettent de répondre à l'exigence de réversibilité et de faire de celle-ci un outil de flexibilité dans la gestion des déchets radioactifs. La réversibilité autorise également l'acquisition progressive de la confiance en la démonstration de sûreté du stockage, en laissant toujours ouverte la possibilité à terme d'une évolution indépendante d'une intervention humaine.

• **Des méthodes d'analyse de sûreté d'un stockage ont été testées.**

Un stockage réversible est conçu pour pouvoir être fermé si le choix en est fait. Il est donc important d'examiner l'adéquation des architectures génériques proposées avec les objectifs de sûreté à long terme, c'est-à-dire leur aptitude à protéger durablement l'homme et l'environnement des déchets qui seraient placés dans le stockage. Cet examen a été mené selon des méthodes éprouvées au niveau international, en particulier sur la base d'une analyse à caractère systématique des différentes caractéristiques du stockage et du granite, des processus qui régissent son évolution à long terme ainsi que des possibles événements qui pourraient la perturber. Cette analyse est fondée sur l'ensemble des connaissances acquises au niveau international dans ce domaine et notamment en laboratoires souterrains étrangers. Elles traitent en particulier des interactions (thermique, hydraulique ou chimique) entre un stockage et le granite, ainsi que l'importante thématique de la rétention de radionucléides par les fractures.

Au-delà d'une appréciation qualitative, des simulations ont été menées pour aboutir à des éléments quantitatifs d'évaluation. Cela nécessite des moyens de calcul dédiés au milieu fracturé qui ont fait l'objet de développements importants au niveau international.

Dans un contexte d'études génériques, il ne peut s'agir de calculs d'impact d'un stockage aboutissant à des doses radioactives auxquelles seraient confrontés l'homme et l'environnement. Les évaluations quantitatives permettent cependant d'apprécier les ordres de grandeur en terme de performance de confinement du granite et des différents composants du stockage. Elles indiquent qu'à condition d'éviter des configurations de site ne répondant manifestement pas aux critères de la Règle fondamentale de sûreté RFS III.2.f. de l'Autorité de sûreté nucléaire, les options techniques proposées permettraient de mobiliser les propriétés favorables du granite.

Du point de vue méthodologique, ces analyses ont permis de tester l'ensemble des outils numériques développés de façon spécifique pour le milieu granitique. Les simulations confirment que l'on disposerait, dans l'hypothèse d'une reconnaissance de site, des moyens d'évaluation de la sûreté d'un stockage en milieu granitique tout au long du processus de recherche.

Les analyses de sûreté menées sur les architectures génériques de stockage proposées soulignent que des méthodes existent pour apprécier la sûreté à long terme d'un stockage dans le granite : description de l'évolution du stockage dans la durée, compréhension et modélisation des phénomènes en jeu, outils informatiques. Au-delà des enseignements méthodologiques, les analyses de sûreté ont souligné la pertinence des options proposées et l'absence à ce stade d'élément rédhibitoire vis-à-vis des objectifs de sûreté.

3. Bilan d'ensemble

Les études menées par l'Andra dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 dressent un bilan quant à l'intérêt du milieu granitique pour un stockage réversible. Les principales questions liées aux spécificités du milieu granitique ont été identifiées et traitées, sans mettre en évidence d'élément rédhibitoire. Des options possibles tant pour la conception d'un stockage réversible que pour la démarche de sûreté ont été définies de manière générique pour le granite. La principale incertitude porte sur l'existence de sites avec un granite ne présentant pas une trop forte densité de fractures, ce qui contraindrait trop fortement les architectures d'un stockage.



Notes



Notes



Notes



Crédit photos :
ANDRA - SKB - NAGRA - POSIVA - H. PASTEAU - PHIL@MIT.EDU - ENRESA
BRGM/S. GENTIER - ANDRA/AECL