



Dossier 2005

Les recherches de
l'Andra sur le stockage
géologique des déchets
radioactifs à haute
activité et à vie longue

Résultats et perspectives

Juin 2005



ANDRA

Agence nationale
pour la gestion des déchets radioactifs

Dossier 2005

Sommaire

Etudier le stockage en profondeur des déchets radioactifs

- p.02 > Une mission d'intérêt général
- p.02 > Un cadre législatif
- p.02 > Les objectifs scientifiques de l'Andra
- p.03 > Contrôles et évaluations

Concevoir un stockage sûr et réversible

- p.05 > La sûreté du stockage
- p.06 > La réversibilité : un impératif

Argile

Les recherches sur le stockage dans l'argile

- p.07 > Un long programme d'études
- p.08 > Le Dossier Argile 2005

L'argile du site de Meuse/Haute-Marne

- p.10 > Les qualités attendues de la roche
- p.10 > Le choix de l'argilite
- p.10 > Le site de Meuse/Haute-Marne
- p.11 > Les conclusions de dix ans d'études sur le site

Les installations de stockage

- p.14 > Une architecture sûre et réversible
- p.15 > Le stockage des déchets B
- p.15 > Le stockage des déchets C
- p.15 > Le stockage éventuel des combustibles usés (CU)

Le centre de stockage en exploitation

- p.17 > De la réception des colis à leur stockage en alvéoles
- p.18 > Les étapes d'une fermeture progressive des ouvrages

Une gestion réversible

- p.19 > La liberté de choix des générations futures
- p.19 > Plusieurs étapes de fermeture

L'évolution à long terme du stockage

- p.21 > Appréhender la complexité du stockage
- p.21 > Les principales évolutions attendues
- p.22 > Un relâchement lent et limité des substances radioactives

La sûreté du stockage et l'impact sur l'homme

- p.25 > Plusieurs scénarios d'évolution
- p.25 > En évolution normale
- p.25 > En évolution altérée

Granite

Les recherches sur le stockage dans le granite

- p.28 > Une démarche globale
- p.29 > Des coopérations scientifiques
- p.29 > Le Dossier Granite 2005

Les caractéristiques des granites français

- p.30 > Quelles propriétés pour un stockage ?
- p.30 > Des types de granites différents

Les installations de stockage

- p.32 > Une conception adaptée aux fractures du granite
- p.32 > Des fermetures en argile contre l'eau
- p.32 > Des colis de stockage étanches sur la durée
- p.32 > Un environnement physico-chimique favorable aux colis
- p.33 > Une architecture qui limite les effets de la chaleur

Bilan

Un bilan d'étape, des horizons ouverts

- p.34 > Quinze années de progrès considérables dans le domaine de la recherche
- p.34 > La faisabilité du stockage dans l'argile est acquise
- p.35 > Un stockage dans le granite est envisageable
- p.36 > Après 2006 : quelles perspectives pour les recherches dans l'argile ?

Etudier le stockage en profondeur des déchets radioactifs

Une mission d'intérêt général

L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) est l'établissement public chargé de la gestion à long terme de l'ensemble des déchets radioactifs produits en France. Placée sous la tutelle des ministères chargés de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement, l'Agence exploite des centres de stockage adaptés aux déchets les plus faiblement radioactifs. Elle dirige des programmes de recherche scientifique pour étudier la possibilité de stocker en profondeur les déchets qui présentent un niveau élevé de radioactivité ou une durée de vie très longue. Enfin, elle réalise un inventaire des déchets radioactifs et met à la disposition du public une information factuelle et vérifiable.

En application du principe pollueur-payeur, l'Andra est financée par les producteurs de déchets radioactifs (centrales nucléaires, usines de traitement, laboratoires de recherche, hôpitaux...) à proportion des volumes produits.

Elle assume ainsi une responsabilité à l'égard de la collectivité nationale en protégeant l'homme et l'environnement des risques liés à ces déchets.

Un cadre législatif

La loi du 30 décembre 1991 a confié à l'Andra la mission d'évaluer la faisabilité d'un stockage de déchets radioactifs de haute activité et à vie longue (HAVL) en couche géologique profonde, dans une logique de réversibilité, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains. Deux milieux géologiques sont étudiés : **l'argile et le granite.**

Le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) pilote deux autres voies de recherches : la séparation des éléments à vie longue, associée à la réduction de la durée de vie des plus toxiques d'entre eux (transmutation) ; le conditionnement et l'entreposage de longue durée en surface ou en faible profondeur.

La loi stipule 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* », c'est-à-dire ne pas leur léguer un problème sans solution tout en leur laissant la possibilité de maîtriser le processus engagé. Elle précise aussi qu'à l'issue d'une période qui ne pourra excéder quinze ans, le Gouvernement adressera au Parlement un rapport d'évaluation de ces recherches, accompagné d'un projet de loi.

Les objectifs scientifiques de l'Andra

L'étude de faisabilité d'un stockage souterrain vise à évaluer comment il serait possible de construire, d'exploiter puis de surveiller un stockage réversible, en toute sécurité pour les hommes et l'environnement.

Dans ce cadre, la mission de l'Andra recouvre :

- un rôle global de pilote pour orienter les recherches et animer la communauté scientifique et technique intervenant dans ce domaine,
- un rôle direct de recherche. Pour le milieu argileux, l'Andra dispose du Laboratoire souterrain de Meuse-Haute-Marne à Bure. Pour le granite, ne disposant pas de laboratoire souter-



Vue aérienne du Laboratoire de recherche de Meuse/Haute-Marne

Etudier le stockage en profondeur des déchets radioactifs



Conteneur standard de déchets vitrifiés (CSD-V)

rain, elle mène des travaux pour évaluer les potentialités des granites français. Pour les deux roches, les laboratoires souterrains étrangers (Suisse, Belgique, Suède) apportent une contribution de premier plan. En outre, l'Andra mène des études liées à l'ingénierie et à la sûreté.

Contrôle et évaluations

La Commission nationale d'évaluation (CNE), instituée par la loi de décembre 1991, est composée d'experts scientifiques français et étrangers. Elle examine les recherches du CEA et de l'Andra et publie chaque année un rapport. Pour éclairer le débat parlementaire de 2006, elle prépare un rapport global d'évaluation des résultats scientifiques. Parallèlement, le ministère chargé de la recherche assure un suivi et coordonne les travaux des deux organismes.

Ce dispositif est complété par l'intervention de **l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN)** et de son appui technique, **l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)**.



Ecorché (maquette) d'un colis CSD-C montrant l'empilement de galettes

De quels types de déchets s'agit-il ?

Les déchets de haute activité et à vie longue (HAVL) rassemblent deux catégories.

Les déchets de haute activité (déchets C) représentent 1 % du volume des déchets radioactifs produits en France, mais 96 % de la radioactivité totale. Ce sont des matières non recyclables issues du traite-

ment des combustibles usés des centrales nucléaires. Ces déchets dégagent une forte chaleur pendant plusieurs dizaines d'années. Il faudra donc prévoir un délai d'entreposage pour les laisser refroidir avant qu'ils puissent être accueillis dans un éventuel stockage.

Les déchets C sont incorporés dans un verre doté d'un fort pouvoir de confinement sur plusieurs centaines de milliers d'années, puis coulés dans des fûts en inox.

Les déchets de moyenne activité à vie longue (déchets B), plus variés, rassemblent principalement des métaux (gaines des combustibles), des boues issues du traitement d'effluents contaminés et des équipements liés à l'exploitation du parc nucléaire. Leur volume, comme leur radioactivité, s'élève à environ 4 % du total des déchets radioactifs. Ils dégagent peu de chaleur et sont soit compactés, soit enrobés dans du bitume ou du béton. Ils sont ensuite placés dans des conteneurs en béton ou en acier.

Les combustibles usés non traités (CU) ne sont pas considérés comme des déchets car ils contiennent des matières valorisables (uranium, plutonium) qui peuvent être récupérées par traitement, puis recyclées. Le stockage des combustibles usés est néanmoins une hypothèse prise en compte dans les études au cas où ceux-ci ne seraient plus traités à l'avenir.



C.IM.ASTE.05.0122.A

Schéma d'un colis primaire de déchets C vitrifiés R7T7

Etudier le stockage en profondeur des déchets radioactifs

Que fait-on actuellement de ces déchets ?

Les déchets HAVL issus de la production d'électricité d'EDF, des usines de traitement du combustible de COGEMA, des centres de recherche du CEA et des activités de la Défense nationale sont actuellement entreposés sur les lieux de production. La majeure partie se situe à La Hague et à Marcoule. Bien qu'ils soient pris en charge en toute sécurité, leur nocivité et leur durée de vie nécessitent une solution spécifique. Cette situation temporaire doit donc déboucher sur des modes de gestion durables et sûrs. Tel est l'objet des recherches entreprises dans le cadre de la loi de 1991.

Comment s'en protéger ?

Il faut interposer, entre ces déchets et l'environnement, des barrières performantes pour isoler ou « confiner » les substances radioactives et les éléments chimiques qu'ils renferment.

A chaque catégorie de déchets correspond un mode de gestion et un système multi-barrières adapté au niveau de radio-



Hall d'entreposage actuel de déchets C

activité et à la durée de nuisance potentielle. Mais le principe du stockage est toujours fondé sur des sécurités multiples : le conditionnement (fût de déchets ou colis), les ouvrages de stockage (alvéole ou case) et la couche géologique.

C'est selon ce principe que sont déjà stockés 90 % des déchets radioactifs produits en France (déchets de très faible, faible et moyenne activité), dans les départements de la Manche et de l'Aube.

Quelles quantités de déchets faudrait-il stocker ?

L'Andra a recensé les déchets B et C existants. Elle a aussi évalué de manière prudente leur production future par les installations actuelles selon différentes hypothèses en matière de traitement des combustibles usés. Les études couvrent ainsi l'éventail des situations possibles, sans parti pris quant aux choix industriels à venir. Selon les scénarios de traitement, le volume des déchets B se situe entre 70 000 et 80 000 m³, celui des déchets C entre 2 500 et 6 300 m³.



Centre de stockage de déchets faiblement et moyennement radioactifs de l'Aube

Concevoir un stockage sûr et réversible

La sûreté du stockage

Le stockage doit protéger l'homme et l'environnement contre les atteintes possibles liées aux déchets radioactifs. Il doit aussi limiter au maximum l'impact radiologique éventuel.

Pour cela, l'Andra a adopté une démarche de sûreté qui privilégie la robustesse du stockage sur de très longues échelles de temps. En effet, certains déchets seront radioactifs pendant des dizaines de milliers d'années, voire plus. En particulier, l'Agence accorde une grande importance à la maîtrise des incertitudes liées au devenir du stockage.

Partant de ces principes, le stockage doit remplir trois fonctions :

- **s'opposer aux circulations d'eau**, car l'eau peut dégrader les colis et transporter la radioactivité présente dans les déchets,

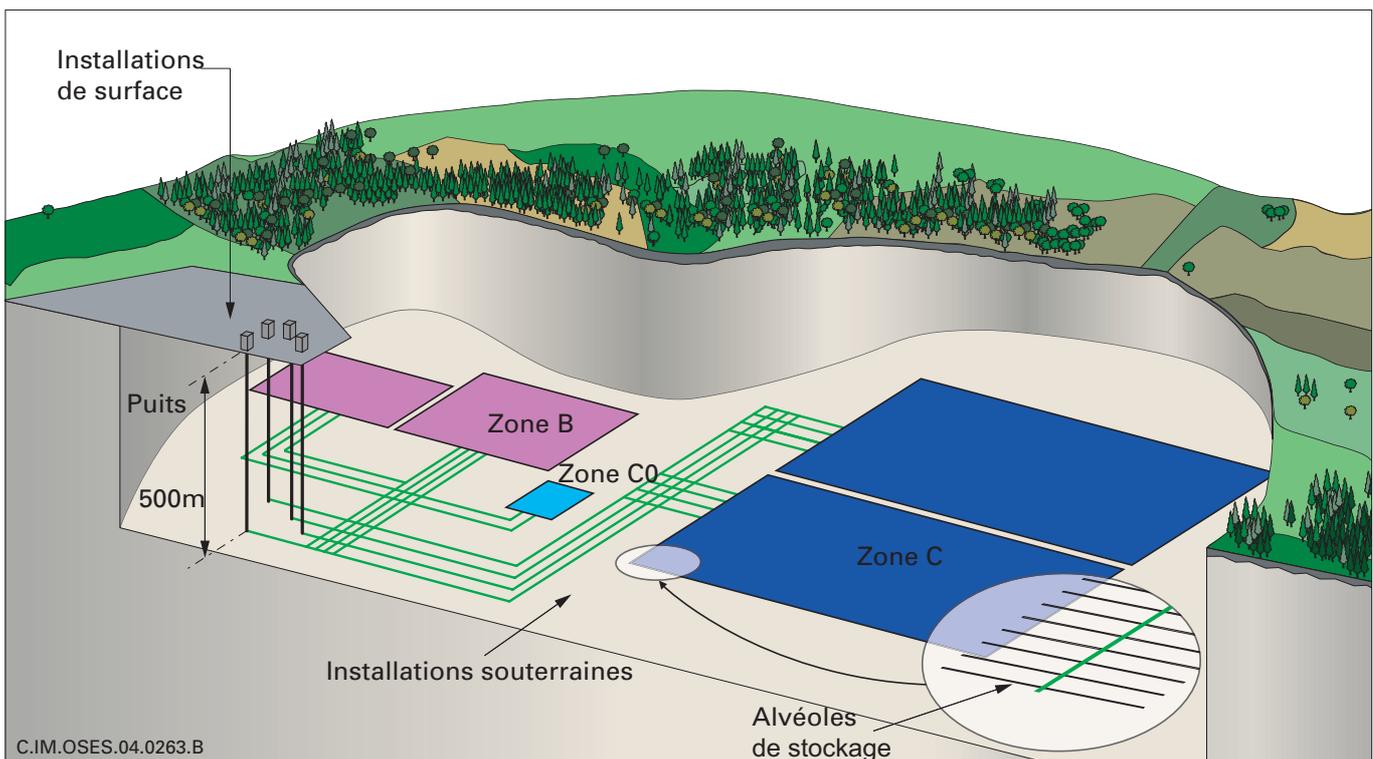
> La Règle fondamentale de sûreté

Emise en 1991 par l'Autorité de sûreté nucléaire, la RFS III.2.f énonce les objectifs primordiaux pour un site de stockage en profondeur :

- > absence de risque sismique à long terme,
- > absence de circulation d'eau importante dans le stockage,
- > roche permettant le creusement des installations,
- > propriétés de confinement vis-à-vis des substances radioactives,
- > profondeur suffisante pour mettre les déchets à l'abri des agressions diverses,
- > absence de ressources rares exploitables à proximité.

- **limiter le relâchement des substances radioactives par les colis et les immobiliser** à l'intérieur du stockage le plus longtemps possible,

- **retarder et atténuer la migration des substances radioactives** qui pourraient finir par sortir du stockage ou de la couche géologique.



C.IM.OSES.04.0263.B

Schéma de principe d'une architecture de stockage en cours d'exploitation

Concevoir un stockage sûr et réversible



Vue du puits d'accès du Laboratoire souterrain Meuse/Haute-Marne

La réversibilité : un impératif

La loi de 1991 évoque un stockage réversible ou irréversible. Depuis, il a été décidé de s'engager résolument dans la voie de la réversibilité.

L'exigence de réversibilité renvoie à une approche modeste au regard des connaissances scientifiques disponibles à un moment donné. Liée à la mise en œuvre du principe de précaution, elle reflète une conduite prudente, offrant la possibilité de revenir sur les choix effectués pour la gestion des déchets radioactifs. Elle implique une démarche progressive de conception, de construction, d'exploitation et de fermeture des installations, incluant les moyens de retirer les colis stockés si une autre décision était prise.

En quoi consisterait un stockage géologique profond ?

Le stockage consiste à placer les déchets dans une couche géologique, à plusieurs centaines de mètres de profondeur. L'objectif est d'isoler les déchets de l'homme et de l'environnement sur de très longues durées, le temps que leur radioactivité ait diminué et ne présente plus de risque pour la population. Le stockage confine ainsi les substances radioactives contenues dans les déchets.

Concevoir un stockage réversible permet de maîtriser en permanence le processus. Cela permet en particulier de reprendre les déchets en cas de nécessité ou si d'autres choix de gestion étaient effectués. Toutefois, à terme, le stockage doit pouvoir devenir progressivement une installation passive, sans surveillance et sans intervention de l'homme, tout en conservant les mêmes performances en matière de sûreté.

Combien de temps le stockage serait-il réversible ?

La réversibilité est possible pendant au moins plusieurs siècles, sans autre intervention que les travaux classiques de maintenance et de surveillance.

Le stockage réversible peut d'abord être géré comme un entreposage, avec mise en place des déchets et reprise de ces derniers. Il est également possible de le fermer progressivement. L'Andra a défini plusieurs niveaux de réversibilité, c'est-à-dire une fermeture en plusieurs étapes. L'Agence a établi des concepts de stockage simples et robustes et recherché des matériaux durables. Elle a élaboré des dispositifs pour faciliter le retrait éventuel des colis et conçu les installations souterraines en modules indépendants pour une gestion souple et évolutive. Un programme d'observation (mesures des déformations, de la température, de la pression, réseaux de transmission de données placés à l'intérieur des ouvrages) a été élaboré pour veiller à la faisabilité technique d'un retour en arrière. A mesure que l'on choisira de réduire le niveau de réversibilité, la reprise des déchets, toujours possible, deviendra plus complexe.

Les recherches sur le stockage dans l'argile

Un long programme d'études



Géologues examinant la paroi de la galerie expérimentale à - 445 m

Depuis près de quinze ans, l'Andra mène un important programme scientifique pour acquérir des connaissances sur un stockage dans l'argile. L'outil de recherche le plus important est le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, implanté à 490 mètres de profondeur au cœur d'une roche argileuse très dure, l'argilite. Cette couche géologique, le Callovo-Oxfordien, est très stable depuis sa formation, il y a plus de 150 millions d'années.

Après de nombreux forages débutés en 1994, la couche du Callovo-Oxfordien, comme les couches qui l'entourent, est étudiée depuis 2004, au sein même de la roche, dans les puits du laboratoire. Depuis novembre 2004, des galeries expérimentales sont en service à une profondeur de 445 mètres. Elles comportent diverses expérimentations destinées à confirmer les données déjà acquises sur le site.

Outre les forages depuis la surface, les analyses d'échantillons et les études en milieu souterrain, les recherches s'appuient sur les travaux menés dans plusieurs laboratoires souterrains étrangers, en particulier celui du Mont Terri en Suisse.

Ainsi, l'Andra a pu retracer l'histoire géologique du site de Meuse/Haute-Marne pour envisager son évolution future. Cette représentation sert de base aux simulations pour évaluer les performances du système.

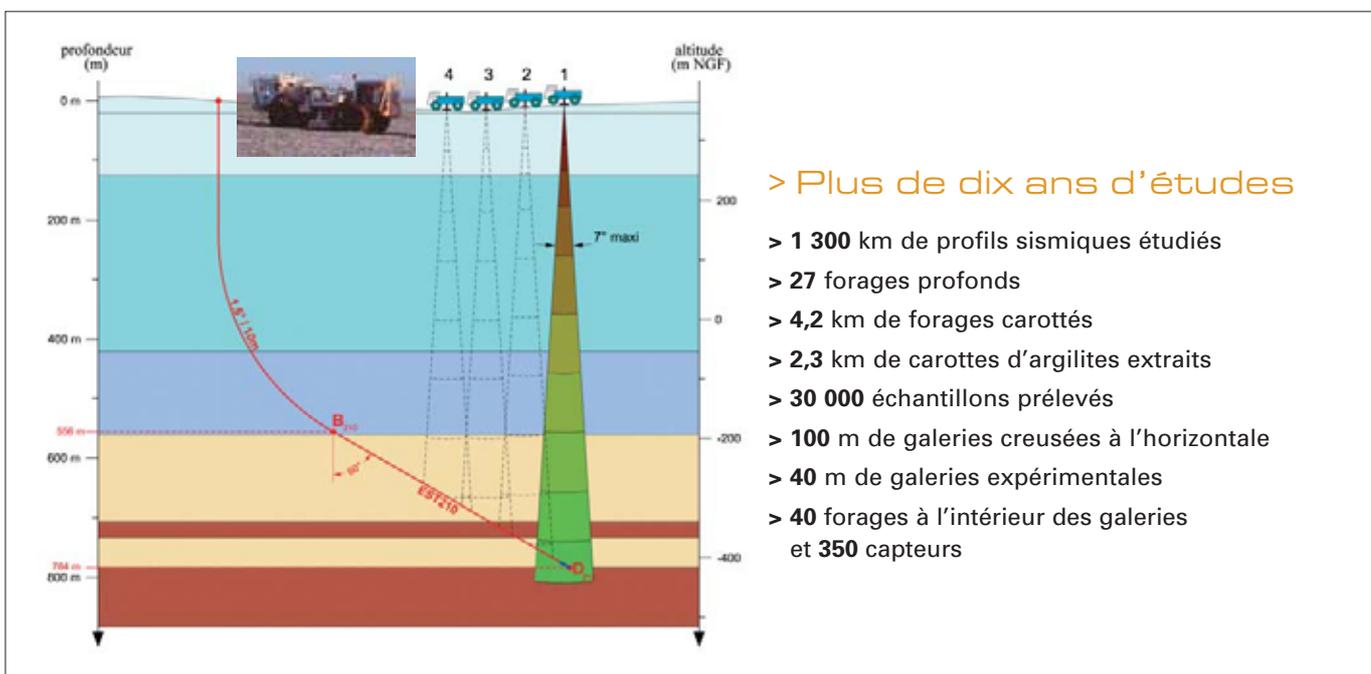


Plate-forme de forage

En dehors des études géologiques, les recherches portent sur quatre domaines complémentaires : les colis de déchets et le comportement des matériaux pour comprendre l'évolution du stockage sur de très longues durées ; la conception du stockage (conditionnement des déchets,

2

ARGILE



Reconnaissance géophysique par des forages déviés

Les recherches sur le stockage dans l'argile

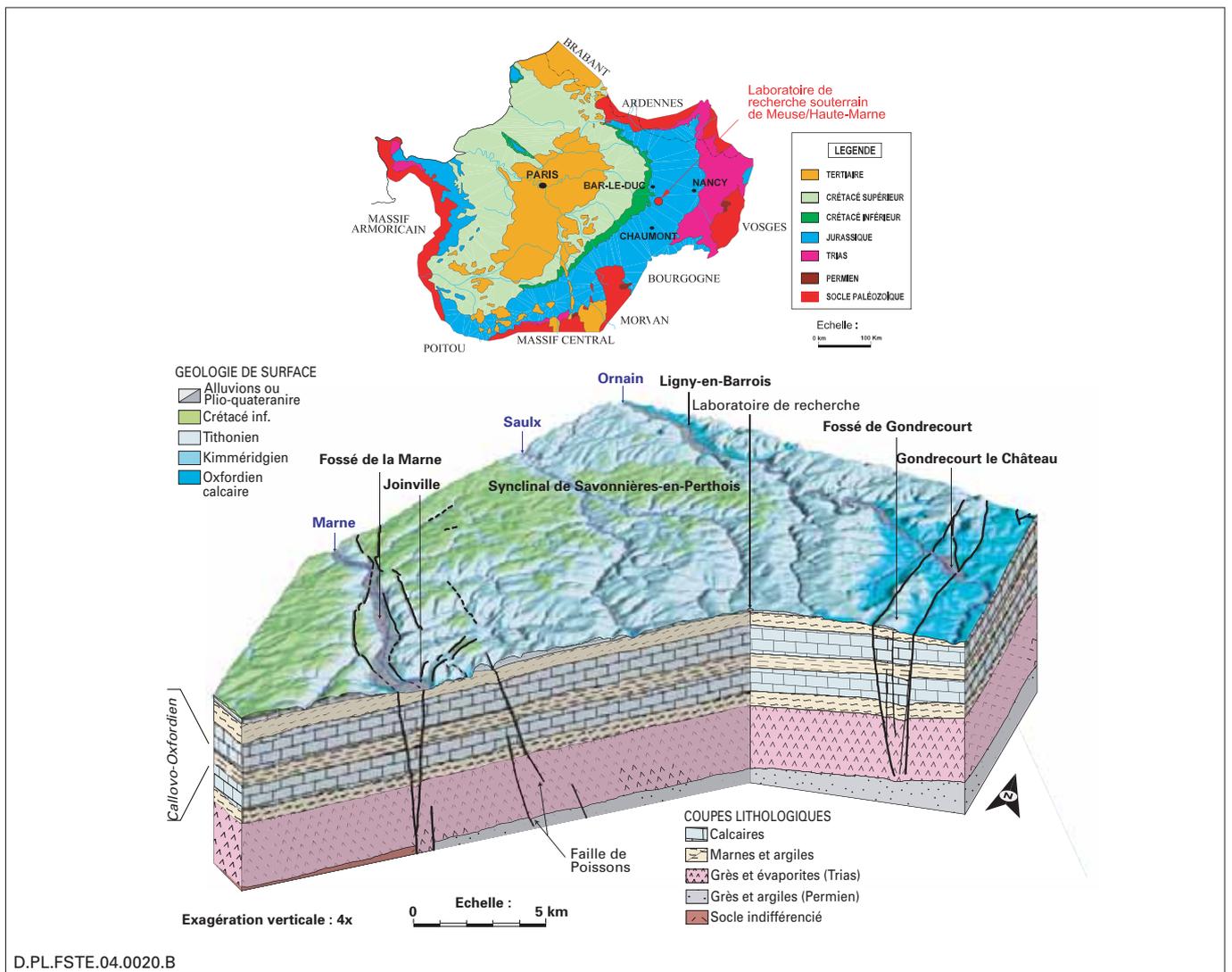
architecture du stockage, méthodes d'exploitation et de fermeture réversible) ; l'évolution du stockage ; la sûreté à long terme.

Le Dossier Argile 2005

Le Dossier Argile 2005, remis aux pouvoirs publics, comprend cinq référentiels de connaissances qui réunissent toutes les données sur le milieu géologique et la biosphère, les matériaux (aciers, bétons, etc.), les substances radioactives, le comportement des déchets dans le stockage et le recensement des déchets HAVL produits et à produire par les installations nucléaires existantes.



« Carothèque » du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne



Bloc diagramme géologique 3D du secteur de Meuse/Haute-Marne

Les recherches sur le stockage dans l'argile

Sur la base de ces données, l'Andra présente son analyse en trois volumes :

- proposition d'une architecture de stockage et d'un mode de gestion dans une optique de sûreté, de faisabilité industrielle et de réversibilité,
- analyse de l'évolution du stockage, en considérant l'ensemble des phénomènes thermiques, hydrauliques, mécaniques et chimiques dans l'environnement sur un million d'années,
- évaluation de la sûreté du stockage et analyse des risques, en situation normale ou accidentelle.

Avec quels organismes scientifiques l'Andra a-t-elle collaboré ?

L'Andra a travaillé avec de nombreux partenaires français : Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), Centre National de Recherche Scientifique (CNRS), Ecole des Mines de Paris, Institut français du pétrole (IFP), Ineris, Institut national polytechnique de Lorraine (INPL), notamment, ainsi qu'avec une centaine de laboratoires.

Sept groupements de laboratoires ont été constitués autour des thèmes d'études de l'Agence : corrosion des métaux, argile, béton, phénomènes couplés thermo-hydrromécaniques, substances radioactives, géomécanique et bio-géoprospective. De même, trois groupements de recherche ont été créés dans le cadre du programme sur l'aval du cycle électronucléaire conduit par le CNRS (FORPRO, PARIS, MOMAS).

Au niveau international, l'Agence a collaboré avec ses homologues suisse, espagnol, allemand et belge, et travaille avec la commission européenne, l'Agence internationale de l'énergie atomique...

> Laboratoire de Meuse/Haute-Marne : repères chronologiques

1992 - Travaux sur la conception du stockage et mise en évidence des connaissances à acquérir.

1994-96 - Travaux de reconnaissance géologique sur deux sites argileux : l'un à la limite de la Meuse et de la Haute-Marne, l'autre dans le Gard.

1997 - Première sélection de concepts de stockage.

1998 - Choix du site de Meuse/Haute-Marne par le gouvernement et définition du programme d'expérimentations, sélection de concepts proposant un large panel de solutions techniques.

1999-2001 - Approfondissement des connaissances sur la couche du Callovo-Oxfordien et début du creusement des puits du laboratoire.

Fin 2001 - Le Dossier Argile 2001 fait un point intermédiaire des connaissances acquises.

2002 - A partir du Dossier Argile 2001, révision du programme scientifique pour la période 2002-2005 et sélection des concepts de stockage (colis et alvéoles).

2003-2004 - Forages sur le laboratoire et aux alentours.

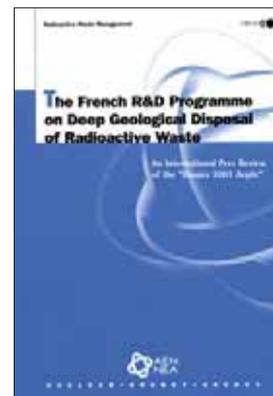
Octobre 2004 - Arrivée du puits auxiliaire à - 490 mètres.

Novembre 2004 - Mise en service de la galerie expérimentale à - 445 mètres dans le puits principal.

Depuis février 2005 - Creusement des galeries expérimentales à la base du puits auxiliaire.

L'Andra soumet-elle ses résultats à des experts internationaux ?

En 2001, l'Andra a produit une première synthèse de ses travaux. Celle-ci a été soumise à l'examen critique d'un groupe d'experts internationaux indépendants mandatés par l'OCDE/AEN, qui a souligné l'importance des connaissances acquises et l'intérêt des résultats. Une seconde revue aura lieu en 2005.



L'argile du site de Meuse/Haute-Marne

Le milieu géologique est au cœur du système de stockage. C'est lui qui doit assurer, à très long terme, le confinement des substances radioactives pour éviter leur migration dans l'environnement.

Les qualités attendues de la roche

Le milieu géologique doit être très stable à long terme, autrement dit peu exposé aux séismes et à l'érosion.

Située à une profondeur suffisante pour ne pas subir les perturbations de surface, la couche argileuse doit être homogène dans sa structure et dans sa composition minéralogique. Principal facteur d'altération et moyen de transport privilégié des substances radioactives, les circulations d'eau dans la roche doivent être faibles. Enfin, la stabilité chimique dans le temps et une aptitude au creusement sont également deux critères nécessaires.

Le choix de l'argilite

L'argilite possède d'excellentes propriétés. C'est une roche sédimentaire dure, très peu perméable. Les éléments dissous dans l'eau, radioactifs ou non, s'y déplacent très lentement car leur migration vient surtout de leur mouvement propre (diffusion) et non de leur entraînement par de l'eau circulante (convection). De plus, elle a la propriété de retenir de nombreux éléments chimiques, et offre un milieu chimique stable et une bonne capacité à absorber les perturbations chimiques. Enfin, l'argilite présente une bonne résistance mécanique tout en restant suffisamment déformable à long terme pour s'adapter aux mouvements qui s'opèrent très lentement dans le temps.

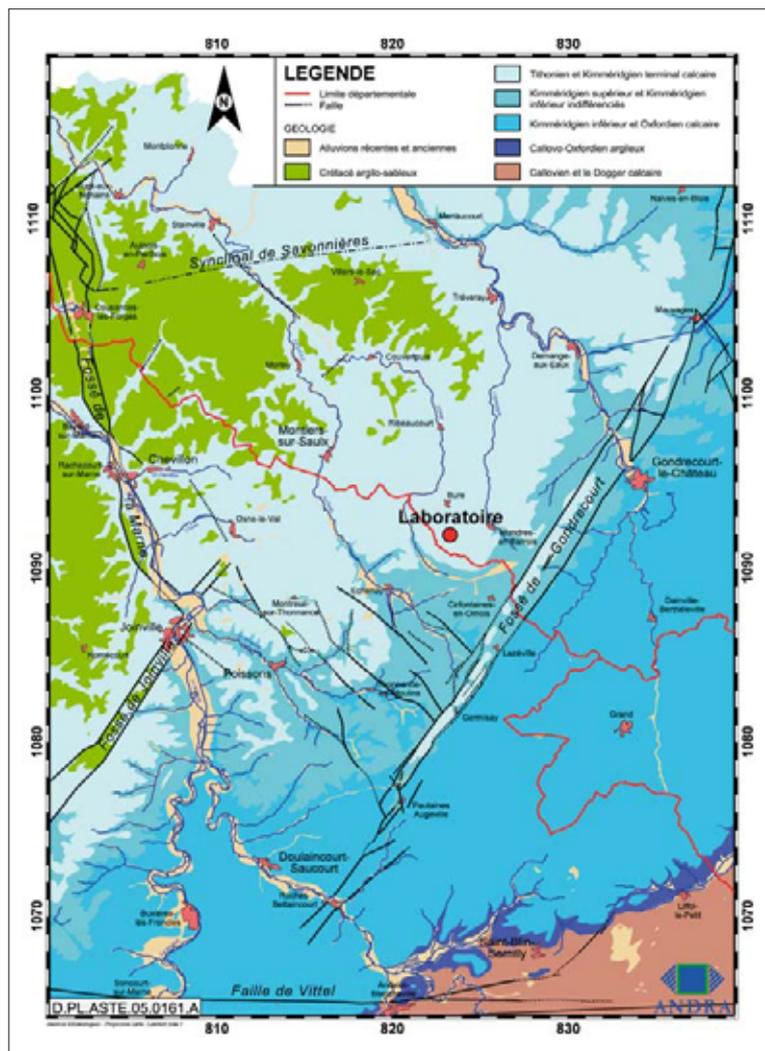
Le site de Meuse/Haute-Marne

Les argilites du Callovo-Oxfordien

Le nord de la Haute-Marne et le sud de la Meuse constituent un domaine géologiquement simple du Bassin parisien, avec une succession de couches horizontales

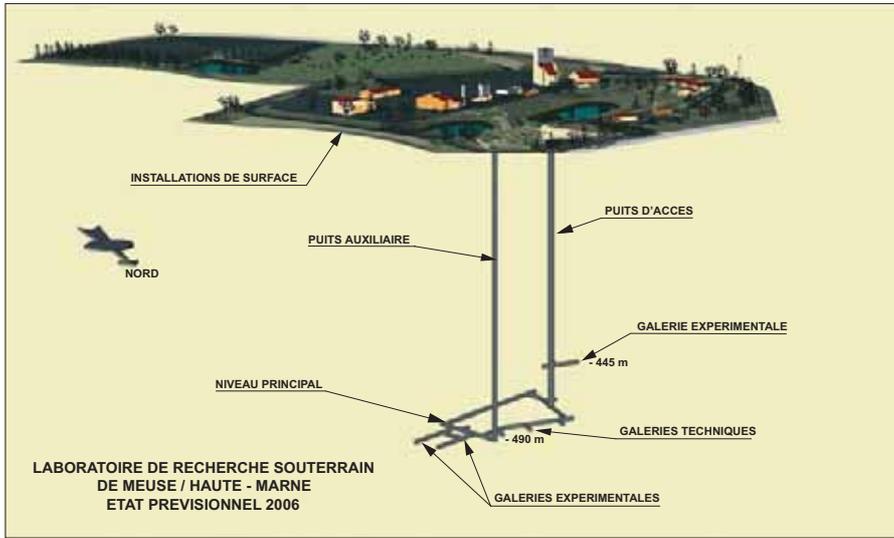
de calcaires, de marnes et de roches argileuses qui se sont déposées dans d'anciens océans.

La couche étudiée est une roche argileuse d'au moins 130 mètres d'épaisseur, datant de 155 millions d'années et située à une profondeur comprise entre 400 et 600 mètres : les argilites du Callovo-Oxfordien.



Carte géologique du secteur de Meuse/Haute-Marne

L'argile du site Meuse/Haute-Marne



Les grandes expérimentations menées au laboratoire

Depuis la surface :

- étude des profils sismiques régionaux,
- forages à grande profondeur et mesures des propriétés mécaniques, de perméabilité et de diffusion,
- forages déviés de reconnaissance à grande échelle des couches géologiques,
- campagnes de géophysique (auscultation du sous-sol par ondes sismiques) en 2, puis en 3 dimensions,
- suivi hydrogéologique,
- réseau d'écoute sismique.



Camions vibreurs lors de la campagne géophysique

Au sein de la roche :

- Pendant le creusement des puits : observation des couches, collecte des écoulements d'eau et mesure des débits dans les couches calcaires situées au-dessus de la couche du Callovo-Oxfordien, mesure des déformations des parois, suivi du comportement mécanique de la roche en temps réel grâce à des capteurs et évaluation de l'endommagement de la roche par le creusement,

- A l'intérieur des galeries : mesure des déformations des parois, mesure de la conductivité thermique, suivi des perturbations chimiques, mesures de perméabilité et de diffusion de l'eau et des substances radioactives, tests de performance sur des saignées remplies d'argile gonflante¹.



Galerie expérimentale (- 445 mètres) du Laboratoire

Les conclusions de dix ans d'études sur le site

En dix ans d'études, l'Andra a acquis les données qui confirment que **la couche du Callovo-Oxfordien du site de Meuse/Haute-Marne présente des caractères favorables** à un stockage de déchets HAVL :

- l'environnement géologique est stable : le risque de séisme est très faible,
- la couche argileuse est régulière et homogène sur une grande surface. Elle ne comporte pas de faille,
- la perméabilité du Callovo-Oxfordien est

¹ - Matériau de très faible perméabilité qui gonfle au fur et à mesure qu'il s'hydrate.

faible : les circulations d'eau sont très réduites et les argilites présentent des propriétés favorables pour piéger et retenir les substances radioactives sur de longues durées,

- la roche supporte le creusement minier,
- ses caractéristiques sont compatibles avec la réversibilité du stockage,
- l'impact des matériaux apportés (ciments, béton, métal...) est très faible et limité au voisinage immédiat des ouvrages,
- les circulations d'eau dans les couches qui entourent le Callovo-Oxfordien sont lentes,
- les résultats obtenus dans le laboratoire souterrain peuvent être transposés sur une zone de 200 km².



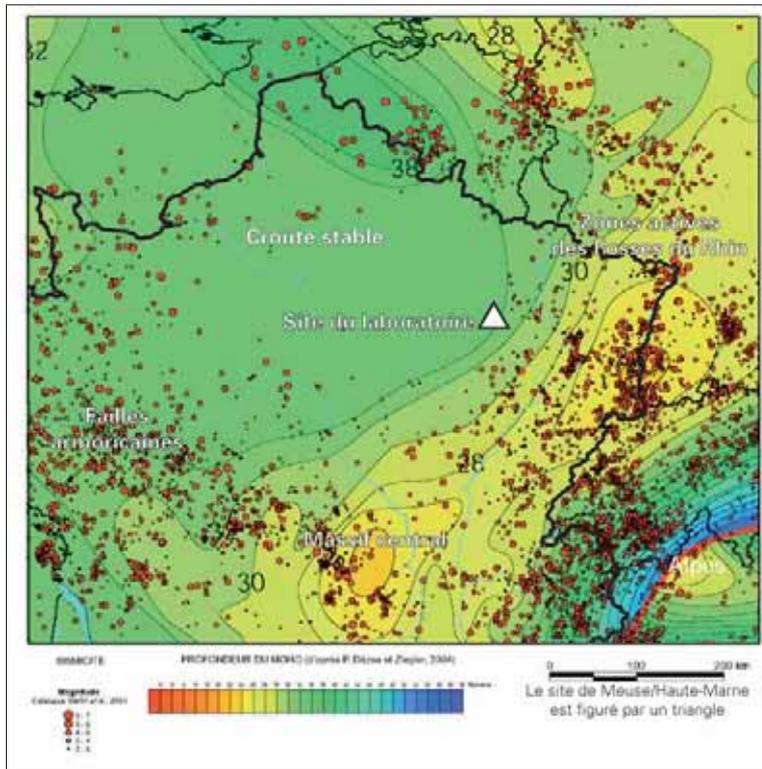
Équipe de scientifiques du laboratoire

Le stockage pourrait-il subir un tremblement de terre ?

Depuis 150 millions d'années, les déformations liées aux mouvements des plaques tectoniques sont faibles, comme dans le reste du Bassin parisien. Elles se limitent essentiellement aux fossés de Gondrecourt et de la Marne, en bordure du secteur d'études. Entre ces failles, la couche du Callovo-Oxfordien est régulière et pratiquement plane.

Les données disponibles confirment que la région est très peu sismique. Mais, par précaution, les ouvrages proposés pour le stockage ont été conçus pour résister à un séisme hypothétique de magnitude $6,1 \pm 0,4$ à 6 km du site, hypothèse la plus pessimiste. Enfin, l'effet d'un séisme serait, en tout état de cause, faible en profondeur.

L'argile du site Meuse/Haute-Marne



Sismicité autour du bassin parisien

Y a-t-il des ressources naturelles à proximité qui pourraient s'avérer utiles dans le futur ?

Le site ne recèle pas de ressources naturelles rares à préserver. En particulier, la nappe d'eau souterraine située sous le laboratoire ne présente pas les qualités requises pour devenir à terme une ressource exploitable pour la consommation ou la géothermie.

L'absence de faille est-elle confirmée ?

Les failles ont été particulièrement étudiées lors des campagnes de géophysique. Les 200 km² explorés au nord et au nord-ouest du laboratoire n'ont mis en évidence aucune faille sur la zone étudiée. Les seules failles connues sont situées hors de cette zone : faille de la Marne (de direction N-NO) et fossé de Gondrecourt (de direction N-E), formant les limites ouest, sud et est du secteur.

Dans le Callovo-Oxfordien, aucun des forages, représentant au total une longueur de 2 300 mètres, n'a traversé de faille secondaire. Seules quelques microstructures d'au plus quelques centi-

mètres ont été rencontrées. Elles sont toutes colmatées et ne modifient pas les propriétés de confinement de la couche.

Les substances radioactives pourraient-elles s'échapper du stockage ?

La couche du Callovo-Oxfordien a une perméabilité très faible. Les circulations d'eau sont donc très limitées, ce qui s'oppose au transport éventuel des sub-

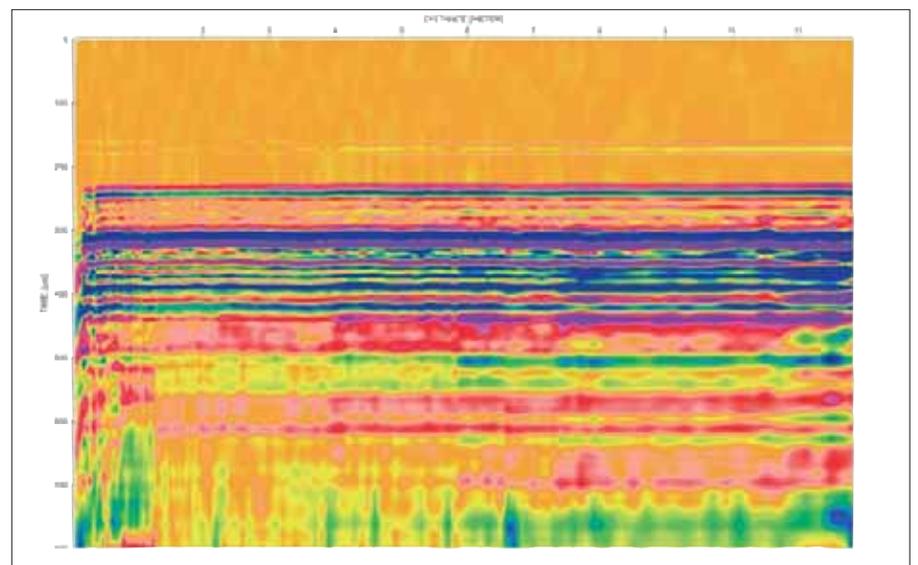
stances radioactives : une goutte d'eau parcourait quelques centimètres en 100 000 ans. Par ailleurs, la couche contient une part importante de smectite, un minéral qui tend à fixer les éléments en solution dans l'eau. Enfin, la composition chimique de l'eau interstitielle de la roche conduit à une précipitation sous forme solide de nombreuses substances radioactives. Dans ces conditions, ces dernières ne peuvent se dissoudre dans l'eau. Tous ces éléments conduisent à piéger l'essentiel de la radioactivité au sein du stockage.

Quelques substances radioactives pourraient néanmoins migrer sur le très long terme (pas avant une centaine de milliers d'années), sans impact toutefois sur l'homme et l'environnement.

Le creusement des galeries de stockage pourrait-il endommager la zone qui accueillerait les déchets ?

Le suivi du creusement du laboratoire a montré que ces argilites sont très dures, se déforment peu et lentement.

Le creusement des galeries crée à leur pourtour une zone endommagée susceptible de constituer un chemin pour l'eau. A 450 mètres de profondeur, il n'y a pratiquement pas de fracturation mais



Evaluation de la zone endommagée par mesures microsismiques

L'argile du site Meuse/Haute-Marne

une micro-fissuration peut apparaître au pourtour des ouvrages. Par exemple, pour un ouvrage de 10 mètres de diamètre, la zone micro-fissurée peut atteindre quelques mètres. Les propriétés de la roche sont peu modifiées. En particulier, celle-ci conserve une très faible perméabilité. De plus, les indices convergent pour penser que les fissures et fractures tendent à cicatriser avec le temps.

Par ailleurs, l'introduction d'air pour la ventilation contribue à assécher la roche et pourrait la fragiliser. L'observation d'ouvrages anciens et les modélisations montrent cependant que ce phénomène est lent dans les argilites et ne dépasse pas l'épaisseur de la zone endommagée.



Creusement dans le puits

La roche pourrait-elle se refermer sur le stockage, empêchant l'accès aux colis ?

L'argilite du Callovo-Oxfordien présente une capacité à se déformer dans le temps. Ce processus est très lent. Le déplacement des parois d'un ouvrage de stockage serait inférieur à quelques centimètres après 1 000 ans. Cela permet de disposer d'ouvrages stables et robustes sur de longues durées, garantissant la réversibilité.

Quelles conséquences aurait la chaleur des colis sur la roche ?

Certains déchets dégagent de la chaleur. Il est donc important d'examiner le comportement de la roche vis-à-vis de la chaleur. Jusqu'à 70°C, on ne décèle pratiquement pas d'effet sur les argilites. Celles-ci peuvent supporter de telles températures pendant environ 10 000 ans, sans altération significative et des températures plus élevées sur de plus brèves durées. Ces estimations permettent de définir les températures acceptables pour un stockage : on a retenu de ne jamais dépasser 90°C dans la roche, et 70°C au-delà de 1 000 ans.

Quel serait le comportement des matériaux apportés par le stockage dans le milieu géologique ?

Dans l'environnement chimique du stockage, la dégradation des bétons prend plusieurs dizaines de milliers d'années. Lorsque le stockage est fermé, les matériaux métalliques, en l'absence d'oxygène, se corrodent très lentement en pro-



Relevé de données expérimentales

duisant des minéraux qui stabilisent leur dégradation. Les études montrent d'ailleurs que l'impact chimique de la corrosion sur les argilites est très limité.

Connaît-on les circulations d'eau dans les couches encadrant les argilites ?

Dans les couches situées autour du Callovo-Oxfordien, les écoulements sont globalement horizontaux et dirigés depuis les plateaux au sud et à l'est du site vers le centre du bassin. L'étude de la topographie sur les deux derniers millions d'années et les prévisions sur les variations climatiques permettent d'appréhender les variations des circulations au cours des 500 000 à un million d'années à venir. Il apparaît que les directions d'écoulements évolueront relativement peu.

Sur quelle zone les résultats obtenus au laboratoire souterrain peuvent-ils être transposés ?

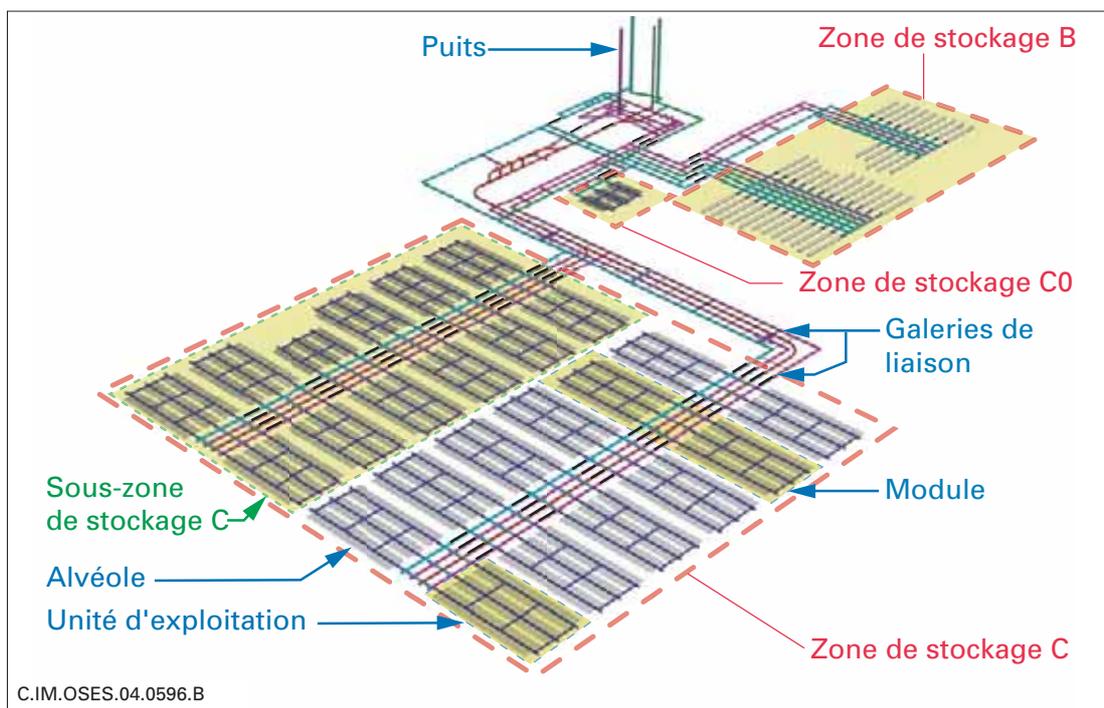
L'Andra a défini une zone géographique où les propriétés des argilites sont similaires à celles du site du laboratoire. Après avoir exploré une zone de 700 km² autour du laboratoire, avec une cartographie précise, la zone de transposition s'étend sur environ 200 km² au nord et à l'ouest du laboratoire.

Pourquoi l'Andra étudie-t-elle l'argile en Suisse ?

Entre 1996 et 2005, l'Andra a réalisé des expérimentations dans le laboratoire du Mont Terri en Suisse. En effet, les argilites de ce site sont proches de celles du Callovo-Oxfordien. L'Agence a testé des outils et des méthodes, acquis des données scientifiques sur le comportement des argiles, validé ses modélisations et mené des essais d'ingénierie grandeur nature. Un résultat majeur a été acquis : les observations faites à l'échelle de l'échantillon demeurent largement valides à plus grande échelle.

Les installations de stockage

L'Andra a conçu un stockage simple et robuste : une architecture modulaire qui rassemble les colis d'une même catégorie et permet une exploitation flexible.



Organisation générale du stockage

Une architecture sûre et réversible

Le stockage est positionné sur un seul niveau, au milieu de la couche géologique, pour bénéficier du maximum d'épaisseur de la barrière constituée par l'argilite.

Il est organisé en zones distinctes selon les types de colis (B, C, CU), séparées les unes des autres et subdivisées en modules. Les modules sont construits et exploités au fur et à mesure des besoins.

Les ouvrages sont conçus pour limiter les perturbations mécaniques. Leur architecture est simple, avec une section en général proche d'un demi-cercle, et leur dimension limitée. Les alvéoles sont espacées et orientées, pour ne pas interagir mécaniquement parallèlement à la direc-

tion de la contrainte de pression la plus forte dans la roche. Un revêtement soutient les ouvrages pendant plusieurs siècles et les vides dans les alvéoles sont limités.

Les ouvrages accueillant les colis C et CU sont conçus pour limiter les perturbations liées à leur fort dégagement de chaleur, grâce à un espacement suffisant entre les alvéoles et à une disposition adaptée des colis. La température doit rester inférieure à 100°C au contact des colis et à 90°C au sein de la roche, tandis que l'architecture est conçue pour qu'au-delà de mille ans, la température soit inférieure à 70°C, voire très en-deçà.

Pour limiter les circulations d'eau, les

ouvrages sont disposés en cul-de-sac.

Si la décision de les fermer était prise, ils seraient scellés par des bouchons peu perméables en argile gonflante.

Les matériaux des alvéoles et des colis (béton, acier, etc.) sont choisis pour durer le plus longtemps possible et préserver un environnement physico-chimique qui retienne les substances radioactives.

L'exigence de réversibilité est intégrée dès la conception du stockage.

Elle conduit à privilégier des matériaux durables, à maintenir la possibilité technique de retirer les colis et à organiser l'exploitation ou la fermeture par étapes et de manière modulaire.

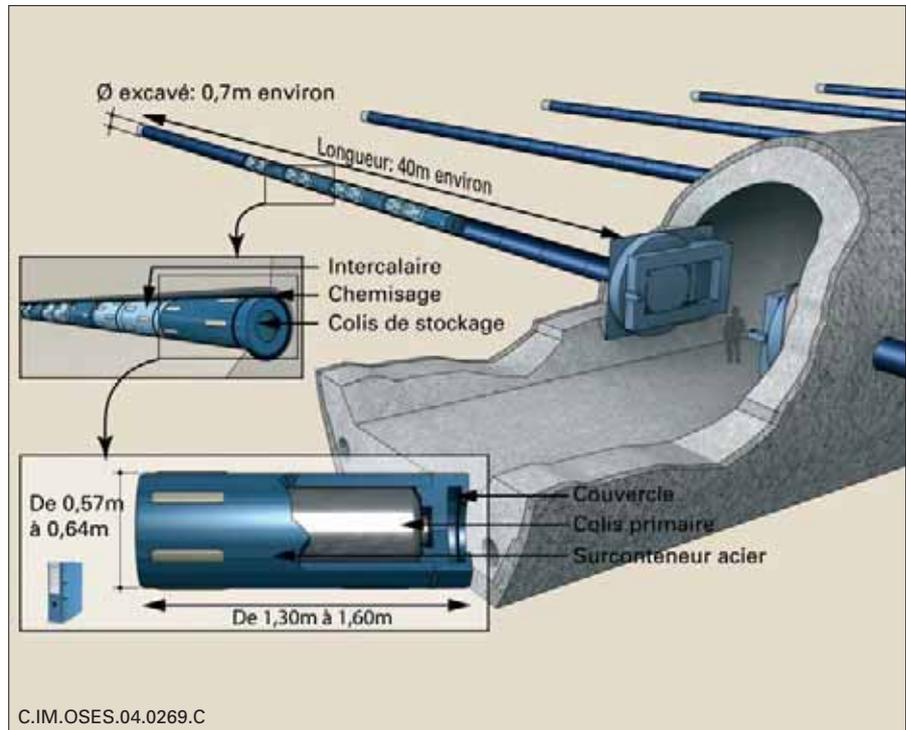
Le stockage des déchets B

Les déchets B dégagent très peu de chaleur. Les colis livrés par les producteurs sont placés dans des conteneurs en béton armé haute performance pour constituer des colis de stockage. Ces conteneurs sont des parallélépipèdes d'environ 1,5 à 2 mètres de hauteur et de 6 à 25 tonnes. Ils sont conçus pour durer plusieurs siècles et assurer une bonne tenue à la chute. Des prototypes de ces colis ont permis de montrer leur faisabilité et de faire des tests en grandeur nature.

Les conteneurs sont placés dans des alvéoles en béton de 250 mètres de long pour un diamètre de 12 mètres. Les alvéoles sont dotées d'un revêtement circulaire en béton haute performance qui garantit sa stabilité pendant une durée de plusieurs siècles. A l'intérieur de ce revêtement, une chambre de stockage ajustée à la géométrie des colis empilés est aménagée.



Démonstrateurs de conteneurs standards de déchets B



Alvéole de stockage de déchets C

Le stockage des déchets C

Les déchets C sont confinés dans du verre où sont piégées les substances radioactives. Ils dégagent beaucoup de chaleur. Une température élevée peut accélérer la dissolution du verre au contact de l'eau. Pour empêcher l'arrivée d'eau sur le verre pendant la phase où sa température est élevée, chaque colis C livré par le producteur est placé dans un conteneur cylindrique étanche en acier, d'une longueur de 1,3 à 1,6 mètre pour 60 cm de diamètre (1,7 à 2 tonnes). L'épaisseur du conteneur (environ 5 cm) est calculée pour résister à la corrosion et assurer l'étanchéité pendant au moins 4 000 ans.

L'alvéole de stockage pour colis C est un micro-tunnel de 40 mètres de long pour un diamètre de 70 cm. Elle est conçue pour préserver le conteneur de la corrosion et n'est pas ventilée pour limiter l'apport d'oxygène favorisant ce phénomène. Pour respecter les limites de température, les alvéoles sont espacées d'une dizaine de mètres et accueillent chacune un petit nombre de colis (6 à 8).

Le stockage éventuel des combustibles usés (CU)

Bien que le stockage des combustibles usés ne soit pas actuellement envisagé, l'Andra a examiné la possibilité de les stocker en couche géologique afin de couvrir toutes les configurations envisageables.

Le concept est similaire à celui des déchets C, mais il a été retenu d'interposer de l'argile gonflante entre le conteneur en acier et les argilites pour tenir compte de la forte chaleur émise par les CU. L'épaisseur du conteneur en acier (un peu plus d'une dizaine de centimètres) permet de résister à la corrosion durant 10 000 ans. Le colis a également été conçu pour éviter qu'une réaction nucléaire en chaîne non maîtrisée puisse se produire.

Les conteneurs qui rassemblent plusieurs assemblages de combustibles usés pèsent 43 tonnes, ceux qui n'en contiennent qu'un, de 8 à 10 tonnes.

Les installations de stockage

L'alvéole CU mesure environ 45 mètres de long pour 2,5 à 3 mètres de diamètre.

Pour éviter l'accumulation de la chaleur, les alvéoles sont creusées à une vingtaine de mètres les unes des autres et le nombre de colis par alvéole est réduit (3 à 4).

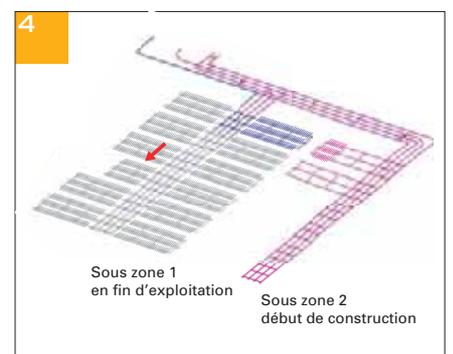
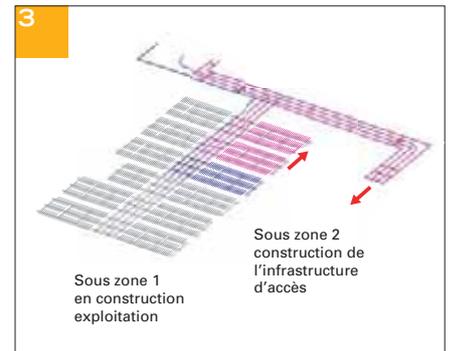
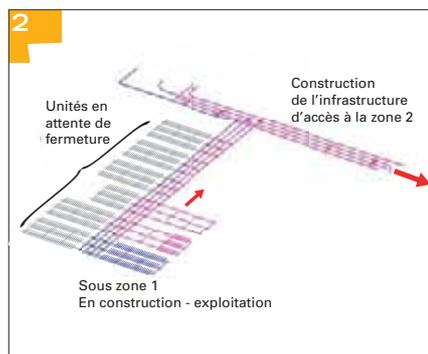
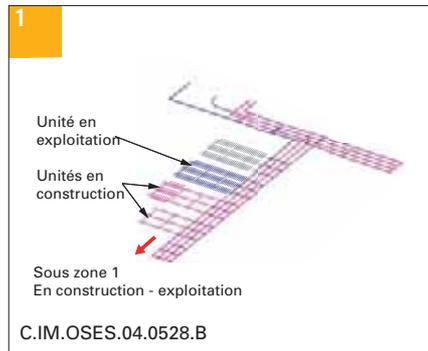


Démonstrateur de colis de stockage de CU

Comment serait assurée la sécurité du personnel à l'intérieur du stockage ?

L'architecture souterraine est conçue pour que les opérations de stockage puissent se dérouler en même temps que la construction de nouvelles alvéoles.

La conception prévoit toutefois une séparation des activités : pour éviter toute interférence, le trafic lié à la construction et à la fermeture est séparé de celui lié aux activités de stockage, qui présentent un risque radiologique.



Étapes de la construction et de l'exploitation d'une zone de stockage de déchets C

En cas de nécessité, le personnel peut être évacué par les puits d'accès et les équipes de secours accèdent rapidement en profondeur. Un système d'évacuation des fumées en cas d'incendie est également prévu. Le réseau de galeries satisfait à toutes les exigences réglementaires en matière de sécurité.

Combien de puits relierait le stockage à la surface ?

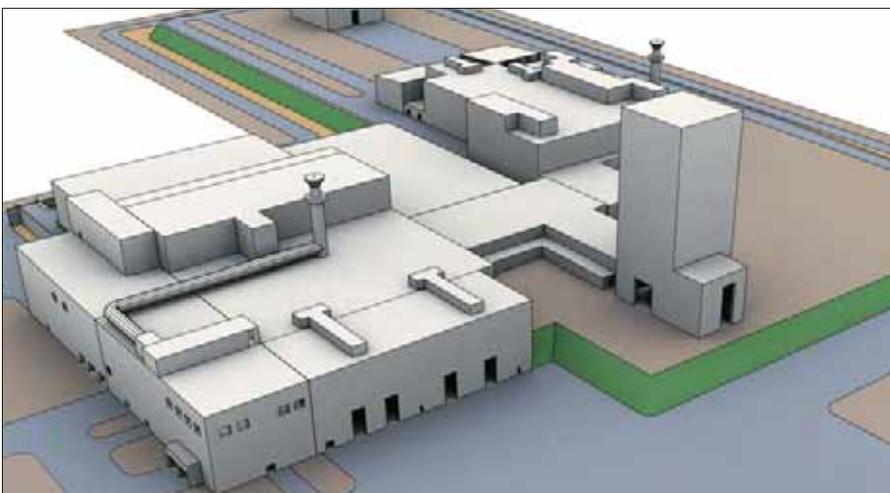
Quatre puits relient la surface au fond. Equipés de dispositifs fiables utilisés dans l'industrie minière, ils sont spécialisés par fonction : descente des colis, transport du personnel, service (transport des déblais et des gros matériels), ventilation pour le retour d'air.

Quelles installations seraient prévues en surface ?

Sur une centaine d'hectares, les installations de surface comprennent :

- une zone nucléaire où les colis livrés par les producteurs de déchets sont réceptionnés, puis conditionnés en conteneurs de stockage,
- une zone industrielle avec les ateliers techniques et les matériaux nécessaires aux travaux souterrains,
- une zone administrative.

Par ailleurs, une zone accueillerait les déblais de creusement qui pourraient servir de matériaux de remblais à la fermeture des galeries.



Installations de surface (projet)

Le centre de stockage en exploitation

La construction des ouvrages, l'exploitation industrielle et la fermeture des installations sont menées de manière progressive et peuvent être simultanées. Cette souplesse permet de faire évoluer la conception ou le mode de gestion du stockage en fonction du retour d'expérience. A ces activités principales s'ajoutent des activités de maintenance et de surveillance nécessaires à une gestion réversible du stockage.

De la réception des colis à leur stockage en alvéoles

Dans les installations de surface, les colis de déchets livrés sur le site sont extraits de leur emballage de transport et mis en conteneurs. Ils sont ensuite contrôlés et provisoirement entreposés. La plupart de ces opérations s'effectuent sans présence humaine, par des engins télécommandés dans des cellules blindées.

Chaque conteneur est ensuite placé dans une hotte assurant la protection radiologique du personnel, puis transféré jusqu'aux installations souterraines.

Pour les colis B, un chariot télécommandé extrait le colis de la hotte et le place dans l'alvéole. Pour les colis C, c'est un robot mobile intégré à la hotte qui pousse le colis dans l'alvéole. Ce dispositif fait l'objet d'essais dans le cadre d'un projet européen (ESDRED).

Les colis CU de petit diamètre peuvent être mis en place selon le même procédé. Ceux de grand diamètre (à 4 assemblages de combustibles) sont, quant à eux, soulevés par des coussins d'air qui sont fixés sur un socle poussé par un chariot autopropulsé. Testé avec succès en Suède, ce dispositif fait aussi l'objet d'essais dans le cadre du même projet européen.

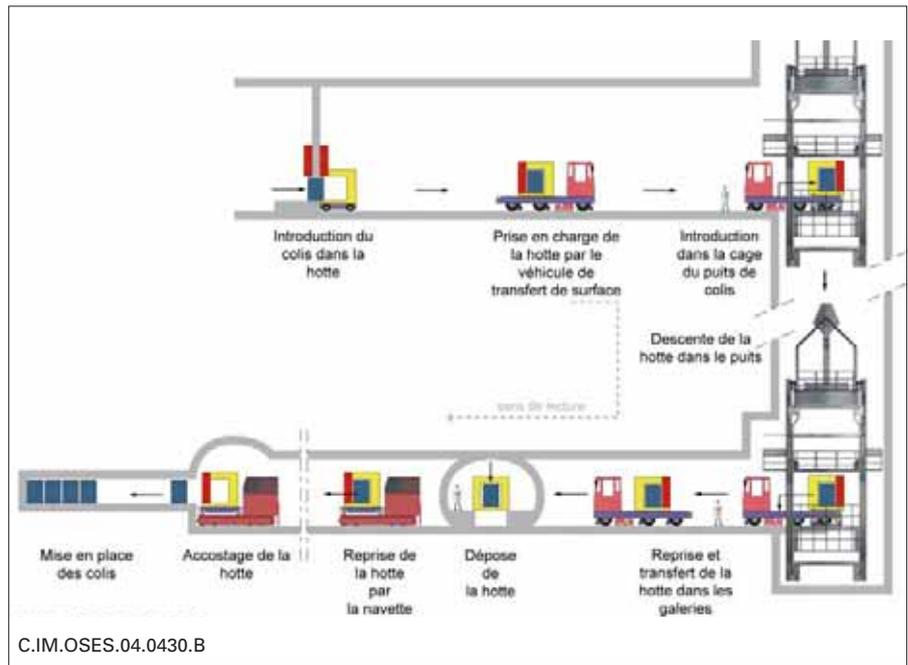


Schéma de transfert d'un colis de stockage

Les étapes d'une fermeture progressive des ouvrages

Conformément à l'exigence de réversibilité, le stockage serait fermé par étapes : scellement des alvéoles, remblayage et scellement des galeries, et des puits. Ces scellements s'opposent à la circulation d'eau dans le stockage. Quant au remblayage des galeries, il limite les déformations dans le milieu géologique.

Les alvéoles B sont d'abord fermées par un mur de protection radiologique en béton, dont le but est de permettre les travaux en toute sécurité, et par environ 30 mètres d'argile gonflante destinés à faire obstacle à l'eau. Pour les alvéoles C et CU, c'est un bouchon métallique de protection contre la radioactivité qui est

Le centre de stockage en exploitation

posé, auquel on ajoute environ 3 mètres d'argile gonflante.

Les galeries sont ensuite remblayées, puis scellées comme les alvéoles B. Les puits sont remplis à leur base par du béton et scellés avec de l'argile gonflante sur une hauteur de 30 mètres. Ils sont ensuite remblayés avec de l'argilite du site, avec, à chaque niveau poreux, un bouchon isolant à base d'argile gonflante (10 à 15 mètres).

Quels sont les risques liés à la construction et à l'exploitation ? Comment s'en prémunir ?

Les principaux risques sont ceux que l'on rencontre dans l'industrie, les mines et les tunnels : incendie, accidents de manutention et de circulation, chutes de blocs, risques électriques, etc., qui donnent lieu à des mesures de prévention classiques.

Toute l'exploitation est conçue pour prévenir le risque d'exposition à la radioactivité. Habituelles dans l'industrie nucléaire, ces mesures consistent à se protéger par des écrans, des systèmes télécommandés et des automates, à confiner les matières radioactives, limiter les rejets de gaz radioactifs et contrôler l'absence de contamination.

Le risque de criticité (réaction nucléaire en chaîne non contrôlée) a également été pris en compte pour les colis CU, les colis B et C ne contenant pas la quantité de matières nécessaire à la réaction. Pour prévenir ce risque, on aménage, comme dans les entreposages existants, des distances de séparation suffisantes entre les colis et les alvéoles et on recourt à des procédés de traitement à sec, l'eau rendant les éléments plus réactifs.

Pour éviter que les colis ne soient endommagés par des chutes, les hauteurs de manutention sont limitées et la résistance des conteneurs et des hottes est surdimensionnée par rapport à la hauteur de chute possible. Ainsi, en cas de chute,

l'intégrité du colis primaire est préservée. La chute en puits a été étudiée, bien qu'elle soit rendue très improbable par les dispositifs usuels de l'exploitation minière. Dans ce cas, un amortisseur de chute limite l'endommagement de la hotte. Les conteneurs C et CU placés à l'intérieur résistent au choc, alors que les conteneurs B peuvent être légèrement fissurés, sans que les colis primaires soient touchés. Toutefois, pour parer à ce dernier risque, des filtres sont prévus pour piéger les substances radioactives qui pourraient être relâchées dans l'air du puits.

Qu'en est-il du risque d'incendie ?

Le risque d'incendie a fait l'objet d'une étude détaillée. Les simulations montrent que la conception du stockage, avec des galeries reliées entre elles à intervalles réguliers, permettent au personnel de

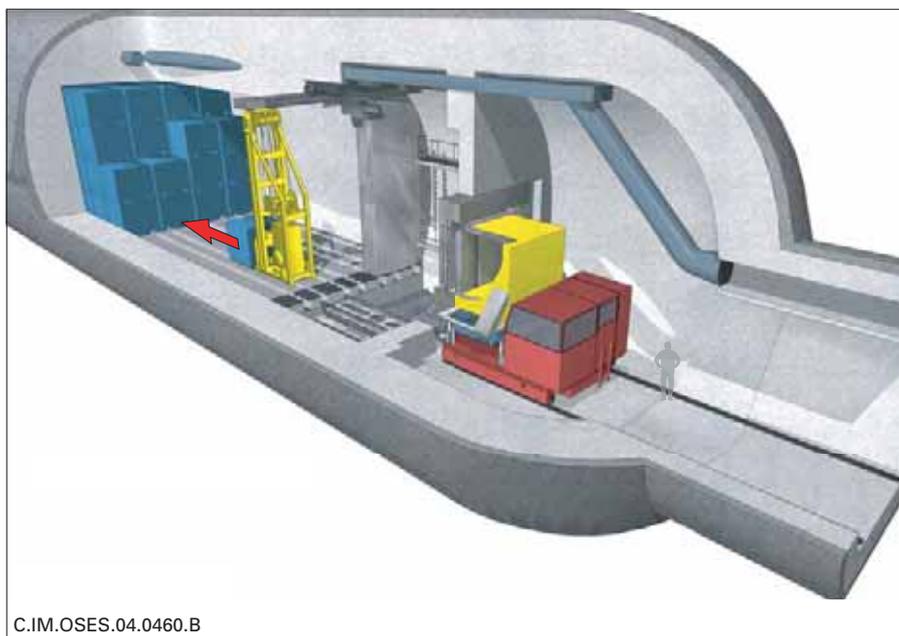
s'éloigner du lieu de l'incendie, de rejoindre rapidement une galerie parallèle alimentée en air frais et de regagner la surface dans de bonnes conditions.

Par ailleurs, les colis de stockage ne subiraient pas de dommages pouvant conduire à la dissémination de substances radioactives.

Quelle serait la dose de radioactivité que pourrait recevoir une personne travaillant à l'intérieur du stockage ?

La dose estimative serait très inférieure aux limites réglementaires actuelles, qui sont de 20 mSv/an² pour les travailleurs et de 1 mSv/an pour le public.

2 - 1 mSv = un millisievert. Le sievert est l'unité de mesure de l'effet produit par la radioactivité sur les êtres vivants.



Stockage des colis en alvéole B

Une gestion réversible

La liberté de choix des générations futures

L'approche de la réversibilité proposée par l'Andra peut être définie comme la possibilité de piloter le stockage de manière flexible et par étapes. L'objectif est de laisser aux générations futures une liberté de décision quant aux choix de gestion.

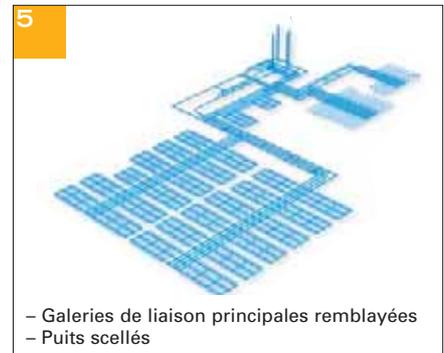
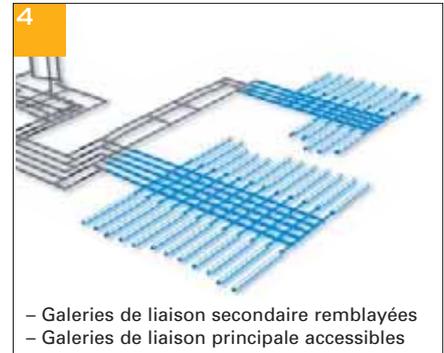
La conception du stockage (architecture modulaire, simplification de l'exploitation, dimensionnement choix de matériaux durables, etc.) vise à laisser les choix les plus ouverts possible. La réversibilité se concrétise par la possibilité de retirer les colis stockés, mais aussi d'agir sur le processus de stockage et de faire évoluer la conception des ouvrages.

Plusieurs étapes de fermeture

Après la mise en place des colis : les alvéoles ne sont pas scellées, mais fermées par des dispositifs qui protègent les personnes. Toutes les infrastructures souterraines restent accessibles.

Après scellement de l'alvéole : les alvéoles sont scellées avec un bouchon d'argile gonflante, leurs têtes restent accessibles. Compte tenu de la lenteur des processus de déformation et de l'absence d'eau pendant plusieurs siècles, les revêtements des alvéoles se dégradent très peu.

Après fermeture d'un module (plusieurs alvéoles) : les galeries d'accès aux modules C et CU sont remblayées avec de l'argilite, mais les galeries de liaison desservant le module restent accessibles. Les modules B, constitués d'une seule alvéole, ne sont pas concernés. La stabilité des ouvrages est assurée à très long terme.



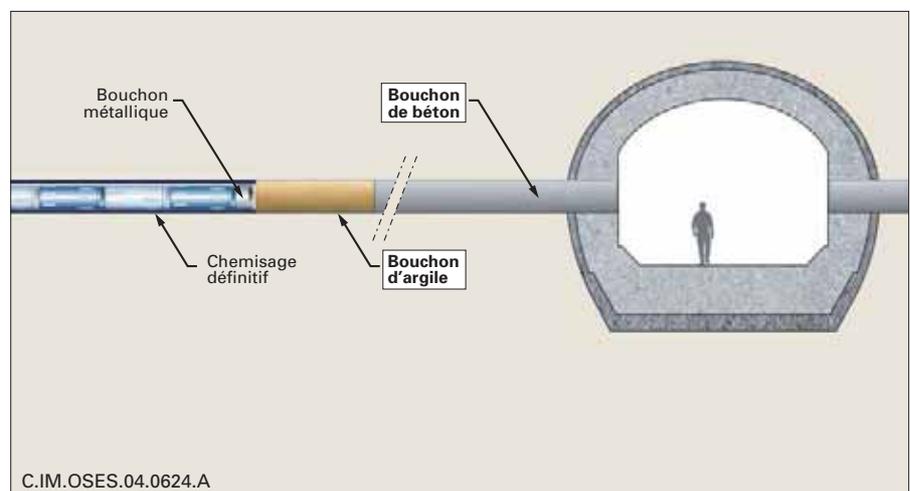
Étapes possibles dans l'exploitation et la fermeture progressive d'un stockage

Après fermeture d'une zone de stockage : les galeries internes à la zone sont scellées et remblayées. Les galeries principales restent accessibles.

Post-fermeture : cette étape débute après le scellement et le remblayage des galeries principales et des puits. Elle correspond à la fin du processus de

stockage. L'installation est rendue passive, c'est-à-dire qu'elle continue à assurer le confinement des déchets sans intervention humaine.

Ce schéma progressif n'est pas le seul envisageable. Il constitue une option possible, elle-même flexible.



Alvéole de stockage de déchets C scellée

2

ARGILE

Une gestion réversible

> Surveiller le stockage pour éclairer les décisions

Les choix de gestion du stockage (maintien en l'état, retour en arrière, passage à une réversibilité moindre) s'appuient sur la compréhension scientifique de son évolution sur une durée de plusieurs siècles.

Un programme d'observation sera mis en place pour tirer un retour d'expérience destiné à améliorer la conception et la gestion.

Des moyens de mesure (déformations, température, pression...) ainsi que des réseaux de transmission de données seront placés dans des alvéoles témoins, des puits, des galeries, des scellements et des remblais, dès leur construction. Ces moyens devront fonctionner sur de longues durées et dans un environnement difficile (rayonnement et température).

L'expérience développée dans le génie civil fournit les meilleures pratiques : choix d'outils de qualité, répartition judicieuse de moyens d'observation redondants, intégration de ces moyens dès la conception des ouvrages.

Pendant combien de temps pourrait-on accéder aux déchets ?

L'Andra ne fixe pas de durée a priori à la réversibilité.

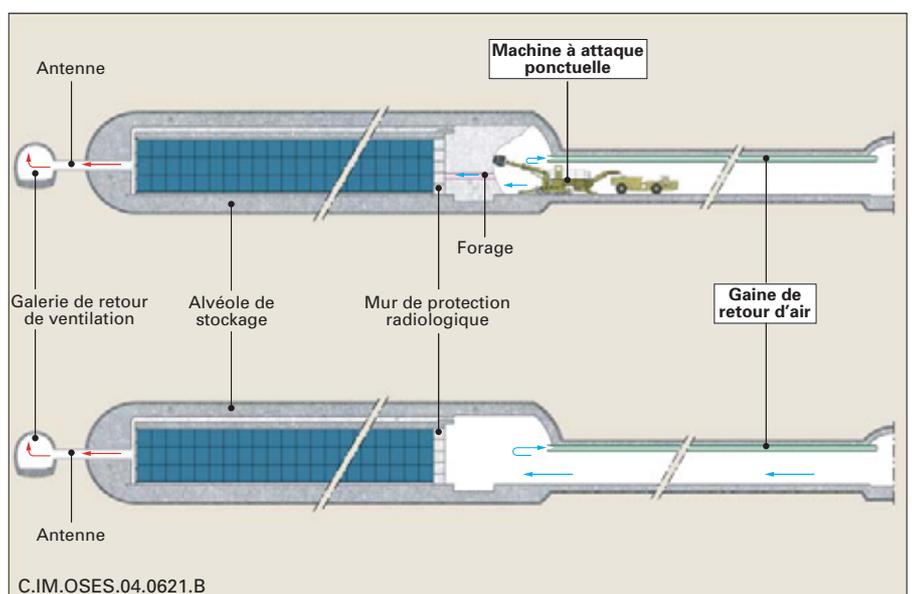
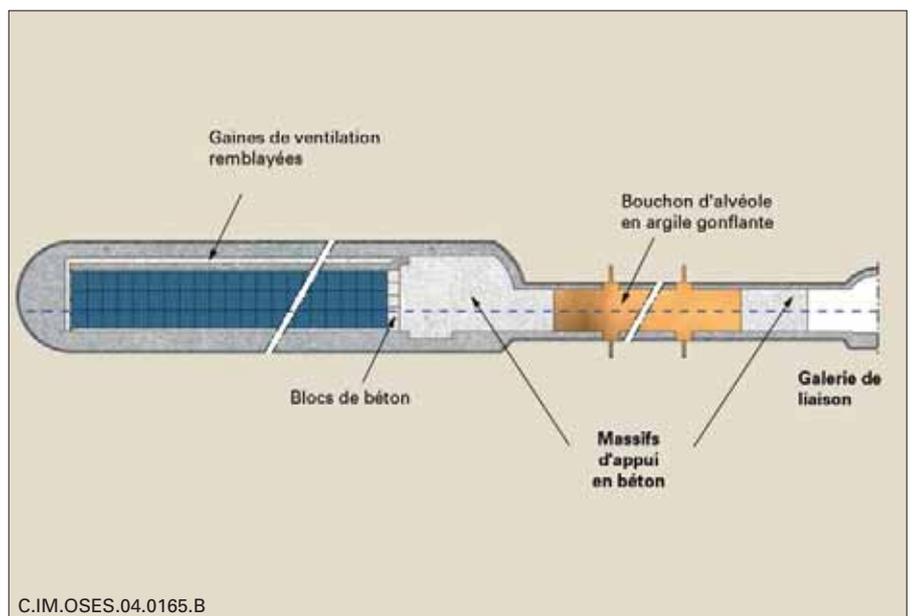
Un élément clé de la réversibilité est la stabilité mécanique des alvéoles, qui est d'au moins 200 à 300 ans sans maintenance particulière. Compte tenu des marges de sécurité prévues, les alvéoles devraient être stables plus longtemps encore. L'observation permettra de réévaluer régulièrement leur durée de vie.

Le terme ultime est la rupture mécanique du revêtement des alvéoles. Au-delà de cette étape, le retrait des colis bloqués par la formation géologique nécessite la mise en œuvre de moyens miniers et une protection particulière contre la radioactivité.

Pour prolonger cette durée, il est nécessaire d'adopter des mesures techniques spécifiques (maintenance renforcée, confortement d'ouvrages, reconstruction...).

Comment pourrait-on concrètement retirer les colis ?

Les équipements et méthodes de retrait des colis sont similaires à ceux utilisés pour leur mise en place. Toutefois, les conditions diffèrent selon l'étape à laquelle est prise la décision. Par exemple, si l'on a déjà mis en place un scellement, il est nécessaire de le déconstruire pour pouvoir accéder de nouveau aux alvéoles et les rééquiper pour une reprise des colis.



Processus de déconstruction du scellement d'une alvéole B



L'évolution à long terme du stockage

Un stockage réversible est une installation susceptible d'être fermée si une telle décision est prise. Le stockage doit alors pouvoir évoluer sur le long terme de manière sûre, sans intervention humaine. L'Andra a donc étudié son évolution selon plusieurs scénarios pour s'assurer que son impact sur l'environnement serait très faible dans tous les cas. Ces études s'appuient sur les connaissances scientifiques et technologiques actuelles et prennent en compte les incertitudes de toute nature, de sa fermeture jusqu'au million d'années.

Appréhender la complexité du stockage

Un stockage constitue un système complexe rassemblant plusieurs composants (colis, ouvrages de stockage, milieu géologique) et dont l'évolution dépend de phénomènes variés : thermiques, hydrauliques, chimiques et mécaniques. Les études ont permis d'évaluer les conditions dans lesquelles les substances radioactives pourraient être relâchées par les colis, puis éventuellement migrer dans l'environnement.

Les principales évolutions attendues

La chaleur a peu d'impact

Le stockage est conçu pour limiter en tous points la température à 90°C. Les maxima sont atteints en une ou quelques dizaines d'années, et il faut environ 1 000 ans aux alvéoles C et 6 000 ans aux alvéoles CU pour revenir autour de 40°C. Ces durées sont très inférieures au temps nécessaire à la détérioration des colis : la chaleur n'a donc que peu d'influence sur le relâchement et le transfert des substances radioactives. Par ailleurs, la hausse de la température ne modifie pas la composition en minéraux des argilites et n'altère pas leurs capacités de confinement.

L'évolution hydraulique a des conséquences maîtrisées

Le stockage perturbe l'équilibre hydraulique initial des formations géologiques. Ces perturbations restent limitées au stockage et à la couche du Callovo-Oxfordien. Entre 100 000 et 200 000 ans, un nouvel équilibre hydraulique s'installe. Les processus chimiques et mécaniques se développent alors de manière plus importante.

Après quelques centaines de milliers d'années et jusqu'au million d'années, les changements climatiques et l'érosion modifieront progressivement les directions des écoulements dans les couches qui entourent le Callovo-Oxfordien. Les eaux s'orienteront vers des exutoires

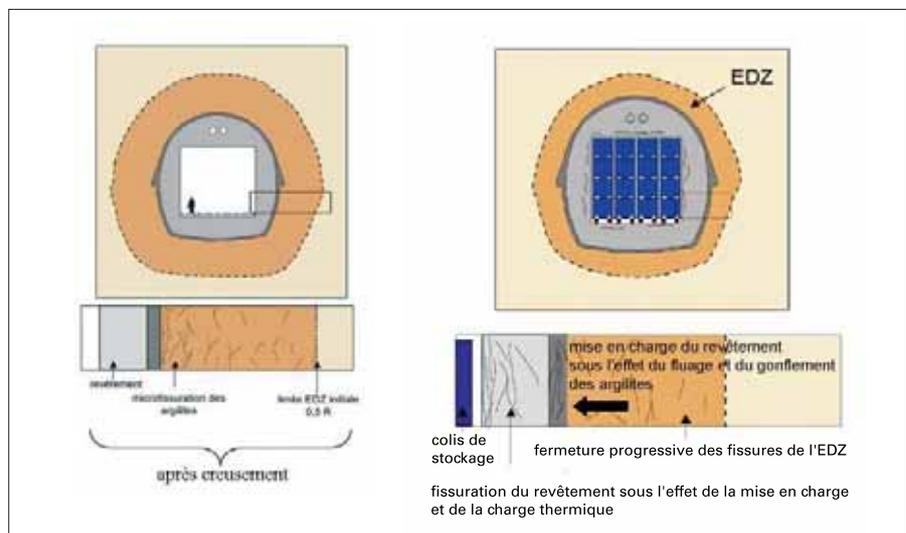
naturels au nord et à l'ouest du site de Meuse/Haute-Marne, sans modifier les vitesses d'écoulement, toujours très lentes. Le Callovo-Oxfordien est trop profond pour être affecté par l'érosion.

L'évolution mécanique est progressive

Les effets mécaniques liés au stockage sont circonscrits au Callovo-Oxfordien, sur une zone de quelques mètres. La zone endommagée (EDZ) se caractérise par l'apparition de microfissures dont la densité décroît avec l'éloignement de la paroi. Une faible fracturation peut aussi apparaître en fonction de la profondeur et de l'orientation par rapport aux contraintes de pression dans la roche. Les calculs indiquent qu'elle n'apparaît

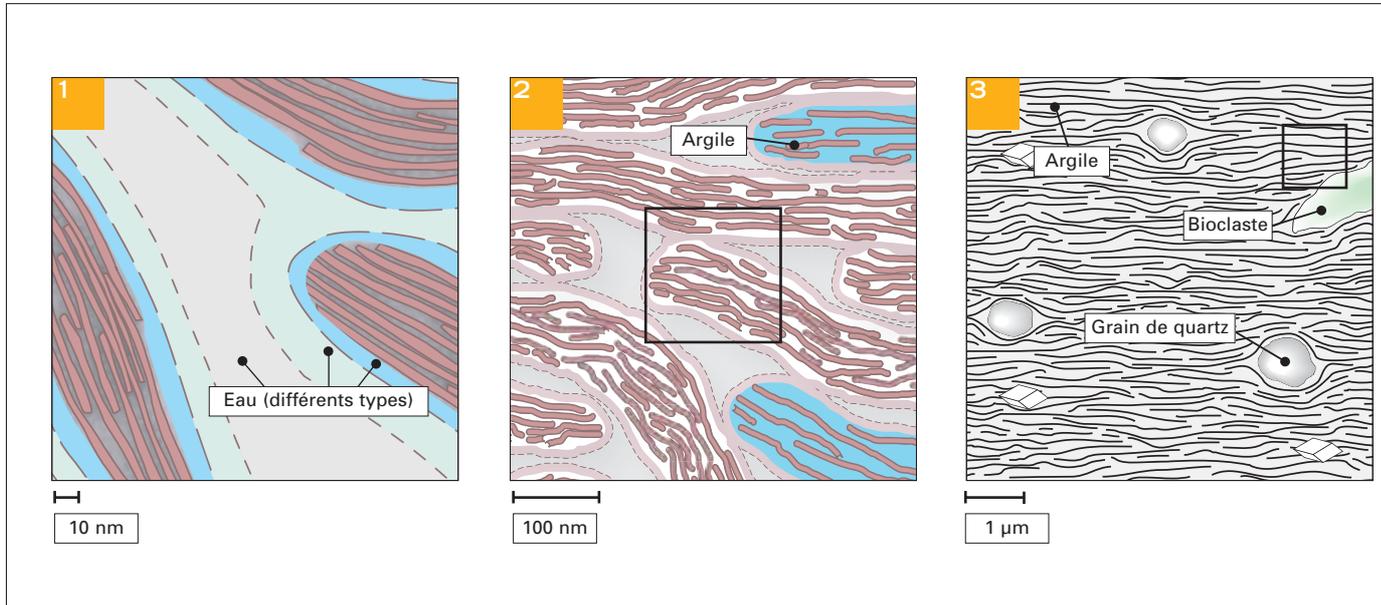
2

ARGILE



Évolution de la zone endommagée par le creusement (EDZ)

L'évolution à long terme du stockage



Schématisation de la texture et de la porosité des argilites du Callovo-Oxfordien

pas à 500 mètres de profondeur et qu'elle s'initie de manière modérée à 600 mètres environ. A l'échelle de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'années, l'évolution des argilites tend à cicatriser cette fissuration.

L'évolution chimique est lente et limitée

La dégradation des bétons et la corrosion des métaux sont des processus très lents. Les perturbations chimiques ont une portée limitée de quelques mètres maximum, ce qui est peu en comparaison de l'épaisseur de la couche géologique. Les argilites conserveront donc leurs propriétés de rétention.

La détérioration des colis, et en conséquence le relâchement des substances radioactives, sont donc eux aussi très lents, sur des durées pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années pour les déchets C.

> La mobilité des substances radioactives

On regroupe les substances radioactives en trois familles selon leur solubilité et leur rétention en milieu argileux :

- > les éléments « mobiles » : ex. iode, chlore,
- > les éléments « moyennement mobiles » : ex. césium,
- > les éléments « très peu mobiles » : ex. uranium, plutonium.

Le stockage géologique contiendrait principalement les éléments des deux dernières familles.

Un relâchement lent et limité des substances radioactives

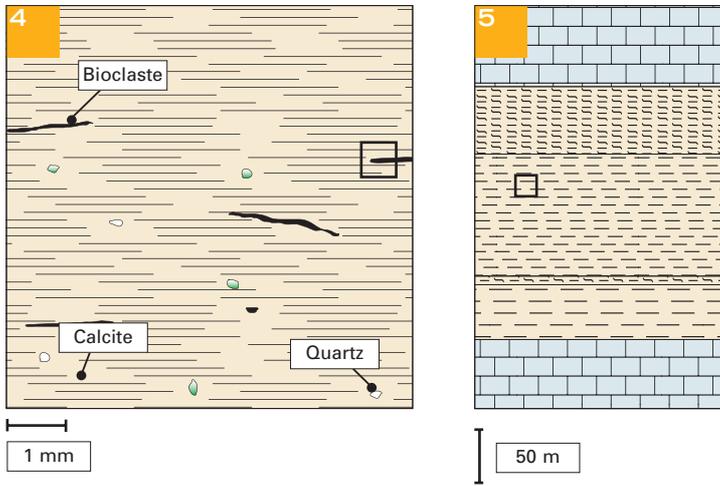
Trois barrières s'opposent au relâchement des substances radioactives : la première est constituée par les colis, la deuxième par les alvéoles et la troisième est le milieu géologique.

Les colis se dégraderont très progressivement dans le temps : corrosion des colis, dégradation des bétons, dissolution des verres en fonction des conditions thermiques et hydrauliques. Les substances radioactives pourront donc sortir des colis. Elles seront alors soit retenues, soit solubilisées en fonction des environnements chimiques qu'elles rencontreront.

La lenteur de la diffusion retarde leur migration et la plupart disparaissent par le phénomène naturel de décroissance radioactive. Seuls quelques éléments mobiles comme l'iode 129, le chlore 36, le césium 135, le sélénium 79 ou le carbone 14 migrent significativement hors des alvéoles.

Ils diffusent alors très lentement dans la roche argileuse.

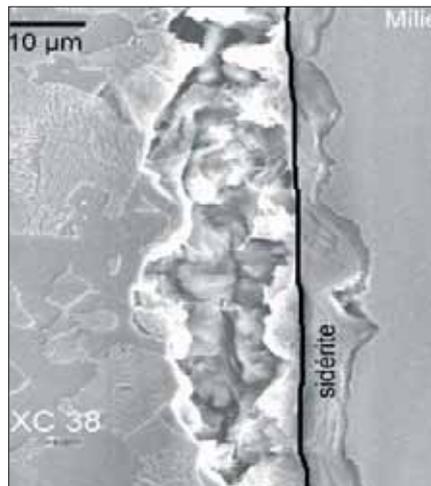
L'évolution à long terme du stockage



Système argile-eau : 1 et 2. Assemblage minéralogique : 3 et 4

Pendant combien de temps les substances radioactives seraient-elles retenues dans les colis ?

Les substances radioactives non gazeuses restent confinées pendant des durées pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années selon les colis. Les substances gazeuses émises en très faible quantité par les colis B ne sortent pas du stockage, sauf le carbone 14 qui se dissout dans l'eau ou se disperse dans le milieu géologique du fait de sa très faible quantité.



Corrosion - vue au microscope à balayage électronique

Avec l'arrivée de l'eau sur les déchets B, en négligeant le rôle possible des conteneurs en béton, les substances radioactives sont progressivement relâchées, sur quelques dizaines à quelques centaines de milliers d'années. Les conteneurs C et CU assurent, quant à eux, une étanchéité d'au moins 4 000 ans pour les premiers et 10 000 ans pour les seconds, selon des estimations prudentes. Après leur dégradation, l'eau entre au contact du verre et des assemblages de combustibles, et ces substances se dissolvent pendant plusieurs centaines de milliers d'années.

Dans quel délai rejoindraient-elles l'environnement ?

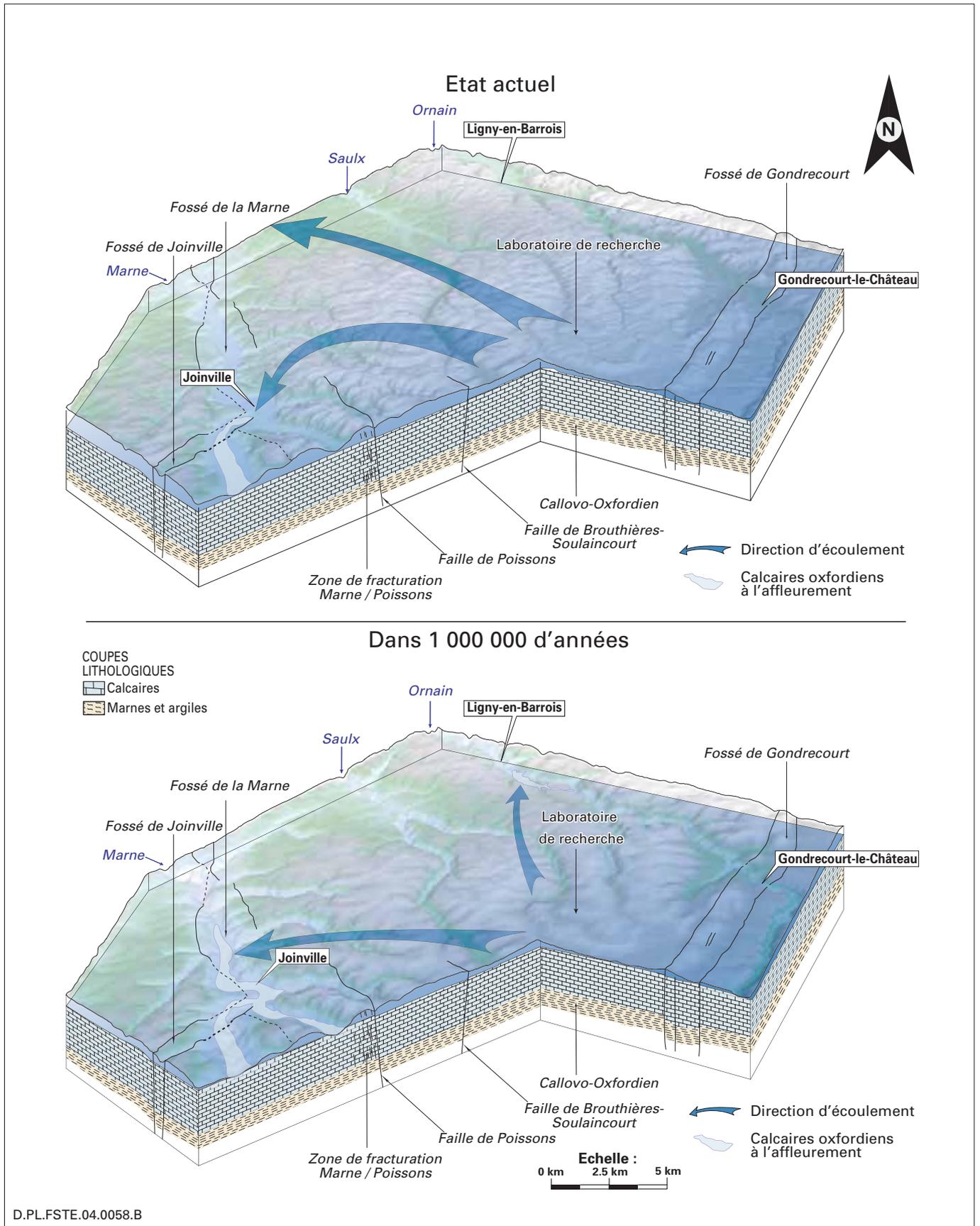
Dans le Callovo-Oxfordien, le transfert des substances radioactives jusqu'aux limites de la couche nécessite au moins une centaine de milliers d'années pour les plus mobiles.

La moitié des éléments se dirige vers le bas (couche du Dogger), l'autre moitié vers le haut (couche de l'Oxfordien). Seuls quelques éléments les plus solubles et dotés des périodes de décroissance radioactive les plus longues ont le temps de parvenir dans les couches situées de part et d'autre du Callovo-Oxfordien au cours du prochain million d'années.

2

ARGILE

L'évolution à long terme du stockage



Représentation schématique de l'évolution des écoulements dans l'Oxfordien carbonaté de l'état actuel à la situation dans un million d'années

La sûreté du stockage et l'impact sur l'homme

Afin d'évaluer si un stockage est sûr à long terme, l'Andra a mené des études pour calculer son impact sur l'homme et l'environnement.

Plusieurs scénarios d'évolution

L'Andra a mené ses calculs dans deux configurations :

- **un scénario d'évolution normale**, à partir d'hypothèses prudentes. Ce scénario ne prétend pas représenter la réalité future mais englobe, dans une vision prudente, l'éventail des situations les plus probables,
- **des scénarios d'évolution altérée** qui intègrent des événements peu probables et des incidents éventuels.

Les calculs prennent en compte une durée d'un million d'années, conformément à la pratique internationale, en intégrant les évolutions climatiques.

L'impact du stockage est calculé à l'aide de « modèles » : en cas d'incertitude faible, on retient le modèle le plus étayé scientifiquement ; en cas d'incertitude forte, on retient un modèle pénalisant. Risques et incertitudes sont donc intégrés dès la conception du stockage.

En évolution normale

Le stockage répond aux critères de sûreté

Les circulations d'eau dans le stockage sont très faibles. La plupart des substances radioactives migrent très lentement à travers le Callovo-Oxfordien et les argilites ont de bonnes propriétés de rétention.

La couche argileuse retarde la sortie des substances radioactives sur des centaines de milliers d'années. Après un million

> L'impact maximum acceptable

L'impact du stockage sur l'homme et l'environnement doit être comparé au seuil établi par la Règle fondamentale de sûreté, à savoir 0,25 mSv/an. Cette dose de radioactivité équivaut à un quart de la limite réglementaire en matière d'expositions d'origine non naturelle pour le public et environ un dixième de la dose annuelle due à la radioactivité naturelle.

L'impact calculé est la dose individuelle reçue par un groupe constitué des individus les plus exposés. Pour cela, on a retenu « des groupes critiques hypothétiques, représentatifs des individus susceptibles de recevoir les doses les plus élevées, parmi lesquels des individus vivant au moins partiellement en autarcie » (RFS III.2.f).

d'années, la quasi-totalité des éléments est totalement atténuée. Seuls l'iode 129 et le chlore 36 présentent des flux significatifs à la sortie du Callovo-Oxfordien.

Il existe de nombreuses marges de sûreté

Pour garantir une sécurité maximale du stockage, des options prudentes ont été retenues : de nombreux paramètres ont été choisis parmi les plus pessimistes ; aucune propriété favorable n'a été allouée aux couches qui encadrent le Callovo-Oxfordien alors qu'elles en possèdent ; les impacts pour le public ont été calculés sur la base de forages particulièrement pénalisants.

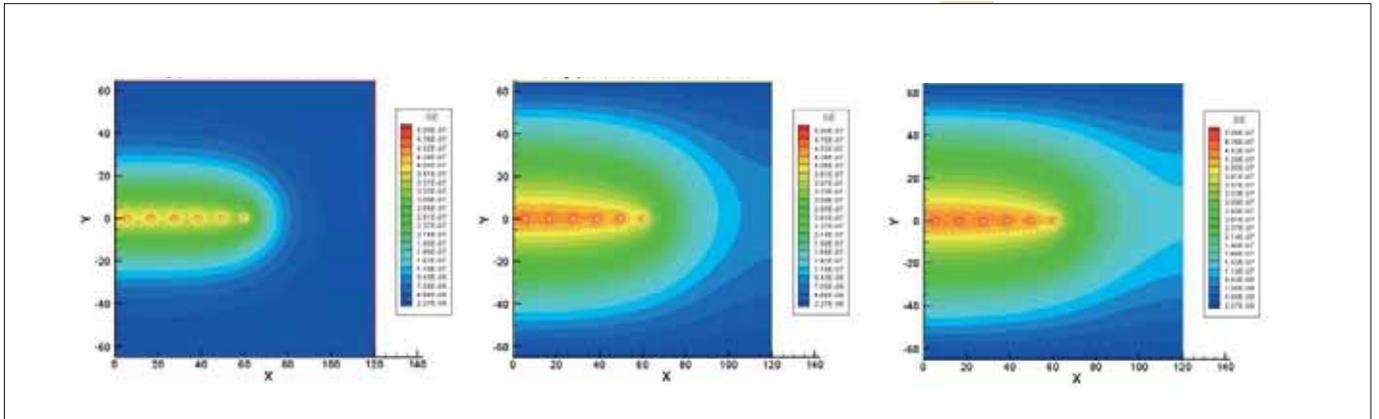
En évolution altérée

Bien que la probabilité soit très faible, l'Andra a exploré les dysfonctionnements possibles du système de stockage et les défaillances externes d'origine humaine ou naturelle. Il a été vérifié que leurs consé-

quences demeureraient acceptables. Cette analyse a été comparée avec les résultats des travaux menés au plan international :

- scellements (galeries et alvéoles B) et bouchons d'alvéoles C et CU défailants : impact très faible en raison de la faible perméabilité de la couche et des dispositions architecturales proposées,
- conteneurs C et CU défailants : apparition plus précoce des impacts, qui ne diffèrent pas sensiblement de ceux observés en évolution normale grâce à la capacité de rétention du milieu géologique,
- forage pénétrant dans le stockage en divers endroits : effet limité à la zone d'impact, grâce au compartimentage du stockage, aux scellements et aux propriétés de la roche.

La sûreté du stockage et l'impact sur l'homme



Progression du sélénium à 100 000 ans, 500 000 ans et un million d'années

A quelle dose de radioactivité pourrait être exposée la population locale ?

L'Andra a évalué les doses de radioactivité à partir de critères pénalisants. L'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79 sont les

principales substances radioactives susceptibles de rejoindre l'environnement à très long terme. Dans la configuration actuelle, comme dans le cadre prévisible à un million d'années, la dose est au moins 10 fois inférieure à la limite de 0,25 mSv/an pour les combustibles usés et plus de 100 fois inférieure pour les

déchets B et les déchets C. Ainsi, avec des hypothèses sévères, la dose reçue serait 1 000 fois plus faible que la radioactivité naturelle pour les déchets B et C.

Les performances du stockage répondent, avec des marges importantes, aux objectifs de dose recommandés par la Règle fondamentale de sûreté.

> Des paramètres très prudents

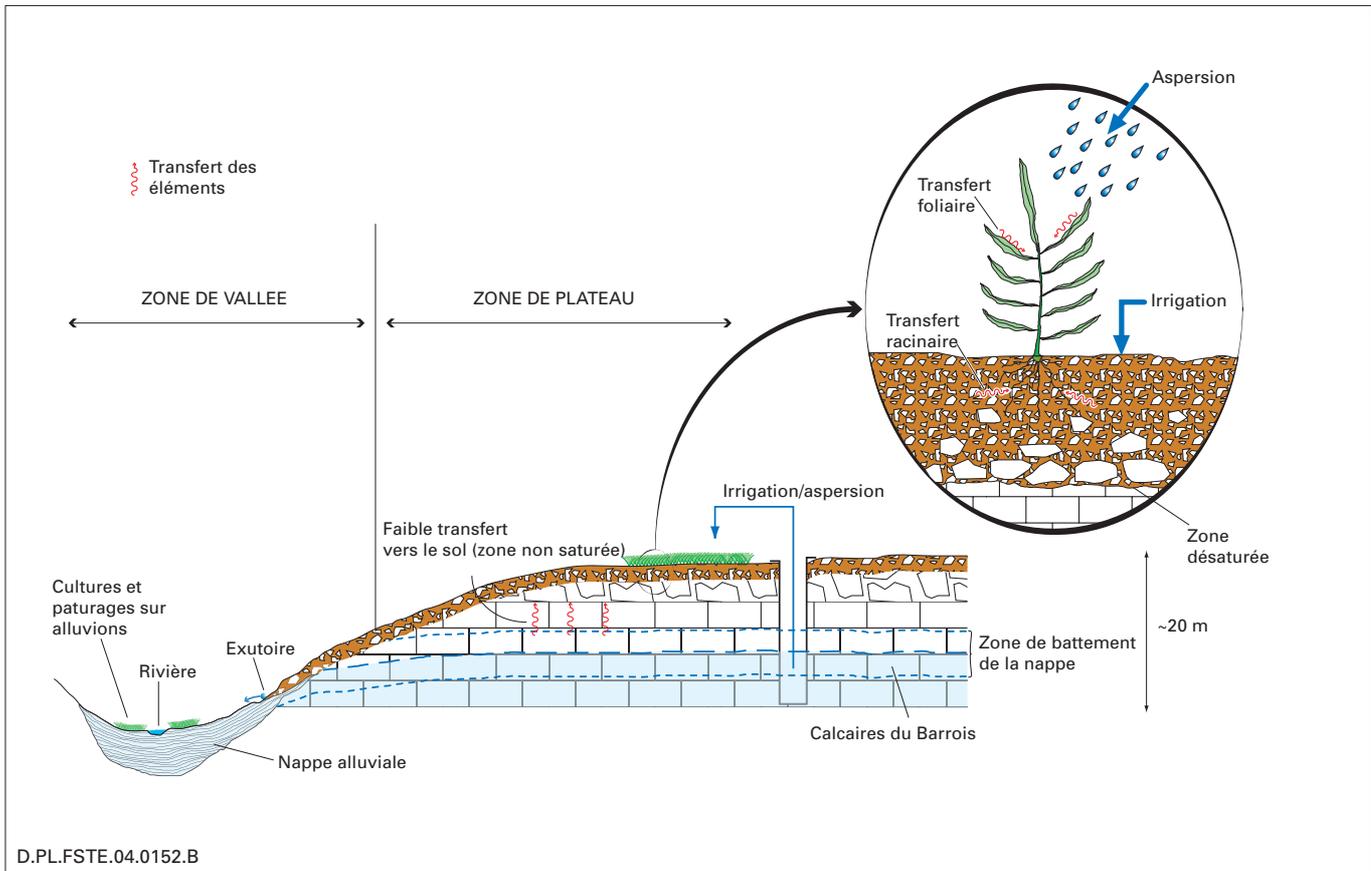
Pour prévoir l'évolution du stockage, y compris en situation normale, l'Andra a retenu des paramètres prudents, voire pessimistes, par exemple :

- > le positionnement du stockage dans l'épaisseur la plus faible du Callovo-Oxfordien et à la plus forte profondeur, sur la zone de transposition,
- > pour les déchets B, des surconteneurs en béton supposés non étanches à l'eau,
- > pour les déchets C et CU, des surconteneurs d'une durée de vie pessimiste (respectivement de 4 000 ans et 10 000 ans) au regard des connaissances disponibles,
- > l'absence de propriétés de rétention des couches qui entourent le Callovo-Oxfordien.

> L'impact des éléments chimiques

Le bore, le sélénium, le nickel et l'antimoine sont des éléments susceptibles d'être présents dans les déchets HAVL. Les résultats des calculs réalisés jusqu'à un million d'années montrent que leur impact est négligeable.

La sûreté du stockage et l'impact sur l'homme



Modèle de transfert des radionucléides de la géosphère à la biosphère sur le site de Meuse/Haute-Marne

Quelle serait cette dose si toutes les fonctions de stockage étaient dégradées simultanément ?

L'Andra a également étudié la situation extrême où plus aucune fonction de sûreté ne serait normalement assurée : propriété de perméabilité de la roche et des matériaux très réduite, performances très faibles des scellements, relâchement de substances radioactives de tous les colis, valeurs pessimistes pour le transport

et la rétention dans l'argilite. L'impact serait alors encore inférieur à la limite de 0,25 mSv/an.

De manière générale, les scénarios incidents ou altérés n'entraînent qu'une augmentation modeste de la dose qui demeure très sensiblement inférieure aux limites imparties.

Même dans des situations peu vraisemblables, le stockage constitue donc un concept efficace et robuste pour protéger l'homme et l'environnement des déchets qui y seraient placés.

Les recherches sur le stockage dans le granite

Une démarche globale

Parallèlement aux recherches sur l'argile, l'Andra a étudié le stockage de déchets HAVL dans le granite. De 1994 à 1996, elle a effectué des travaux de reconnaissance géologique pour implanter un laboratoire souterrain dans le granite du département de la Vienne. A la suite de l'avis de la Commission nationale d'évaluation, ce site n'a pas été retenu par le Gouvernement. En 1999, ce dernier a nommé une mission de concertation pour recueillir les avis des populations sur quinze sites jugés favorables sur le

plan géologique par un comité d'experts nationaux et internationaux. Cette mission n'ayant pu aboutir, l'Andra a établi, l'année suivante, un programme de recherches valorisant les données acquises dans les laboratoires souterrains étrangers et dans des contextes géologiques variés.

En l'absence de site précis, les travaux n'ont pas pu évaluer la faisabilité d'un stockage sur un site particulier : ils ont évalué l'intérêt général du milieu granitique et proposé des concepts génériques, susceptibles de répondre, dans le contexte géologique français, aux objectifs de sûreté à long terme.

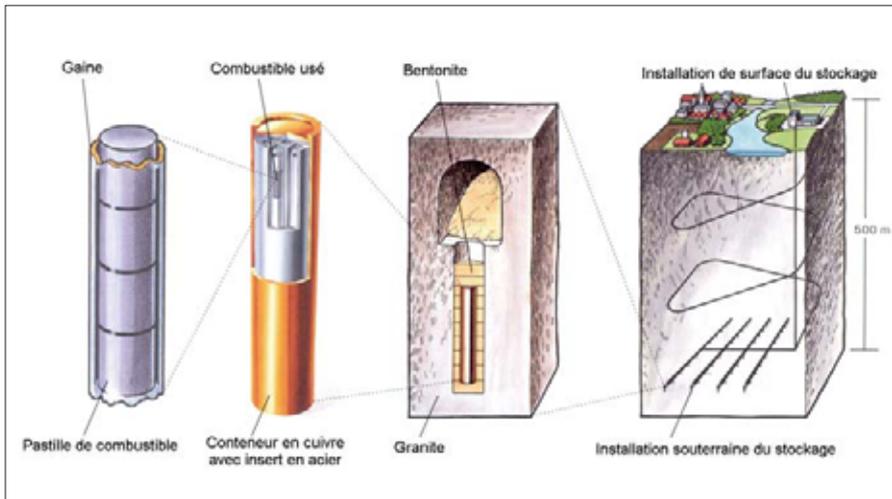
Les recherches ont porté sur quatre domaines :

- le milieu granitique,
- la conception générique d'un stockage réversible dans le granite : architecture, conditionnement des déchets, exploitation et fermeture du stockage. Certaines données, relatives notamment aux colis et aux matériaux, sont communes avec les études menées sur l'argile,
- l'évolution du stockage (thermique, mécanique, chimique et hydraulique),
- les analyses de sûreté à long terme.



Expérimentation au laboratoire d'Åspö (Suède)

Les recherches sur le stockage dans le granite



Le concept de stockage suédois en milieu granitique pour les combustibles usés

Quels enseignements l'Andra a-t-elle tirés des granites étrangers ?

Au niveau international, les acquis sur le granite sont très importants. L'Andra a participé aux expérimentations menées dans les laboratoires souterrains de Suède (Äspö), de Suisse (Grimsel) et du Canada (lac du Bonnet), ainsi que sur le site d'Olkiluoto (Finlande) et au Japon. Les principales coopérations ont porté sur l'étude du milieu granitique (structuration d'un massif, méthodes de reconnaissance, écoulements des eaux en profondeur, capacité de la roche à retenir les substances radioactives), les ouvrages de stockage et l'analyse de sûreté.

Des coopérations scientifiques

L'Andra a noué de nombreux partenariats scientifiques, notamment avec le Bureau de recherches géologiques et minières, le Commissariat à l'énergie atomique, le CNRS et l'École des Mines de Paris, en particulier pour transposer au contexte géologique français les résultats obtenus dans les laboratoires étrangers. Elle s'est aussi beaucoup appuyée sur les travaux menés en laboratoires étrangers, notamment en Suède et en Suisse. Elle a également participé activement aux travaux conduits depuis la surface en Finlande.

Le Dossier Granite 2005

L'Andra a structuré ses connaissances sur le granite autour de cinq « référentiels » : quatre sont communs avec le Dossier Argile 2005 (sur les matériaux, les substances radioactives et leur migration) ; le cinquième rassemble les données disponibles sur les granites français.

Trois volumes font la synthèse des acquis :

- proposition d'options génériques d'architectures de stockage, sûres et réversibles,
- analyse de l'évolution du stockage,
- analyse de sûreté. Sans site spécifique, elle s'assure qu'aucun des critères étudiés ne présente de caractère rédhibitoire et souligne les éléments essentiels pour la conception d'un stockage et les travaux à mener sur un site éventuel.

Les caractéristiques des granites français

Comme pour l'argile, l'étude d'un stockage consiste à identifier les caractéristiques du milieu géologique et à concevoir des architectures fondées sur ses caractéristiques, afin d'isoler les déchets sur de très longues durées tout en répondant à l'exigence de réversibilité.

Quelles propriétés pour un stockage ?

En l'absence de site spécifique d'étude, la conception d'un stockage se fonde sur les propriétés communes des granites français.

Le granite présente des propriétés intéressantes pour un stockage de déchets HAVL : il est dur, résistant, peu poreux, très faiblement perméable et d'une bonne conductivité thermique.

La plupart des massifs granitiques s'étendent en profondeur, offrant ainsi une grande flexibilité pour la conception d'un stockage.

Les éventuelles variations de la composition de la roche d'un point à un autre d'un massif ne modifient pas significativement ses propriétés. En revanche, les fractures parcourant les massifs sont à prendre en compte. Pouvant aller jusqu'à quelques dizaines de mètres, les petites fractures peuvent affecter la perméabilité locale de la roche. Quant aux failles, qui peuvent atteindre plusieurs kilomètres, elles sont beaucoup moins nombreuses. Elles constituent les lieux privilégiés de la circulation de l'eau, mais cette circulation se fait en profondeur et lentement. Enfin, dans un granite, l'environnement chimique en profondeur est favorable à la conservation des matériaux d'un stockage et à l'immobilisation de la plupart des substances radioactives.

Des types de granites différents

Les zones granitiques étudiées ont été décrites à partir de la cartographie de surface et de leurs caractéristiques en profondeur, extrapolées à partir des connaissances géologiques et de calculs. L'Andra a ensuite classé les granites français en différentes catégories et apprécié leurs propriétés pour la conception d'un stockage.

Les différences entre les granites français, en ce qui concerne leur résistance mécanique et la composition de leurs eaux, ne sont pas de nature à remettre en question les options de conception proposées. En revanche, leurs propriétés thermiques (avec, par exemple, des températures allant de 17°C à 30°C à 500 mètres de profondeur) peuvent modifier le dimensionnement d'un stockage.

Les grandes fracturations sont disposées différemment selon les massifs.



Localisation des formations granitiques en France

Les caractéristiques des granites français

Toutefois, les zones où pourrait être implanté un stockage répondent à des caractéristiques communes à l'ensemble des massifs français étudiés.

Trois configurations de massifs ont été déterminées, cette classification permettant d'adapter les architectures et de mener des analyses de sûreté à caractère générique.

Où se trouvent les massifs granitiques considérés pour ces études génériques ?

En l'absence de site désigné, l'Andra a étudié les différents massifs granitiques de manière à en dresser une typologie et à apprécier leurs propriétés. Cela a concerné 78 zones de plus de 20 km² situées dans le Massif central et le Massif armoricain, à l'écart des grandes failles.

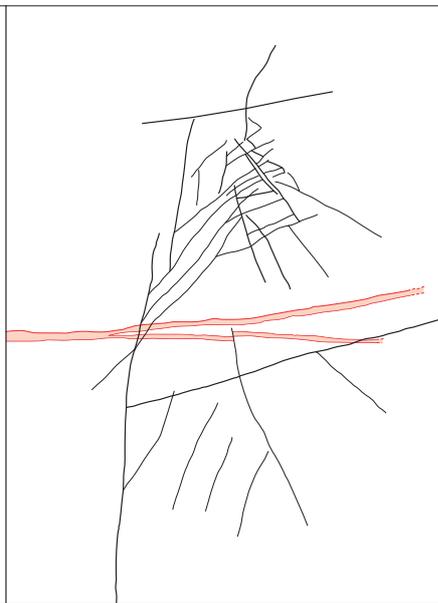


Obélisque inachevée dans la carrière de granite d'Assouan (Egypte)



G.PL.FSTE_05.0119.A

Détails de la structure d'une grande faille



La présence de fractures n'est-elle pas une contre-indication au stockage ?

Si les fractures d'un granite peuvent permettre à l'eau de circuler et, à ce titre, être préjudiciables, elles sont aussi le siège de phénomènes susceptibles d'immobiliser ou de retarder la migration des substances radioactives. En effet, les substances radioactives peuvent y être piégées ; des colmatages peuvent également apparaître. Des expérimentations au cœur de la roche, notamment au laboratoire souterrain d'Äspö en Suède, ont permis de comprendre ces phénomènes. Il demeure que l'identification de blocs granitiques « sains » (sans faille) constitue un enjeu majeur, car c'est dans de tels blocs que le stockage des déchets est étudié.

Les installations de stockage

Une conception adaptée aux fractures du granite

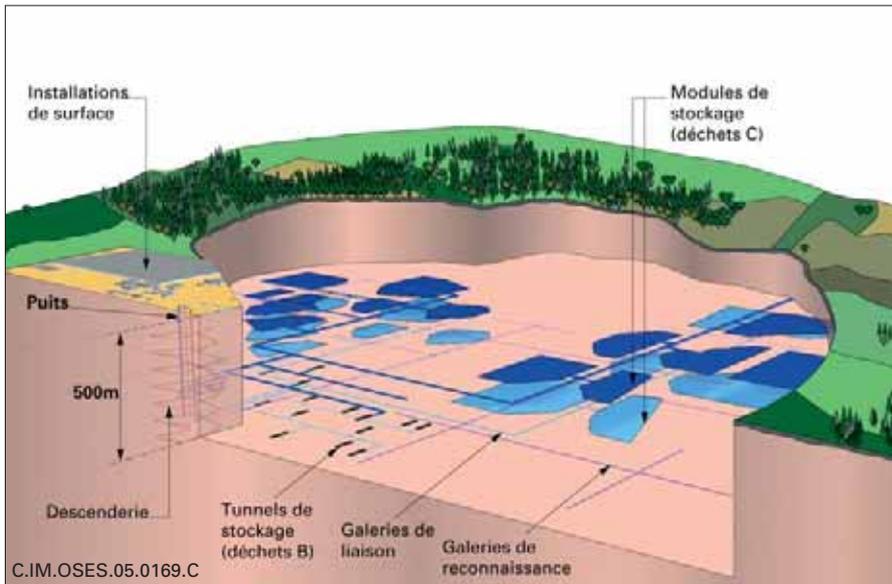


Schéma d'implantation possible en milieu granitique

Implanté à l'écart des grandes failles, le stockage est réparti en fonction des catégories de déchets (B, C) et CU, par zones suffisamment distantes les unes des autres pour éviter les interactions thermiques ou chimiques entre les colis. Chaque zone est divisée en modules regroupant un ensemble d'alvéoles. Pour limiter les circulations d'eau, ces alvéoles sont implantées dans des « blocs » de granite très peu perméables et sans faille. Les accès reliant la surface au fond sont implantés de façon à éviter de drainer les eaux de surface.

L'épaisseur disponible entre 300 et 1 000 mètres de profondeur offre la flexibilité nécessaire pour adapter l'architecture à la fracturation du granite. Le stockage peut ainsi être conçu sur deux niveaux, distants d'une centaine de mètres.

Des fermetures en argile contre l'eau

Les accès et les galeries du stockage sont susceptibles de rencontrer des fractures conductrices d'eau. Pour limiter les circu-

lations d'eau dans le stockage et retarder la migration des substances radioactives vers l'environnement, les galeries et les accès sont remblayés lors de leur fermeture progressive. Dans une logique de réversibilité, il sera toujours possible de les rouvrir pour accéder aux colis. Des scellements en argile gonflante sont également posés dans les galeries aux endroits qui recoupent des failles. Les alvéoles sont fermées par des bouchons d'argile gonflante de faible perméabilité.

Des colis de stockage étanches sur la durée

Les colis livrés par les producteurs sont placés dans des conteneurs, l'ensemble constituant les colis de stockage. Les conteneurs des colis B et C sont similaires aux conteneurs proposés pour le stockage en milieu argileux (béton pour les premiers, acier pour les seconds). Pour les combustibles usés, l'Andra reprend le



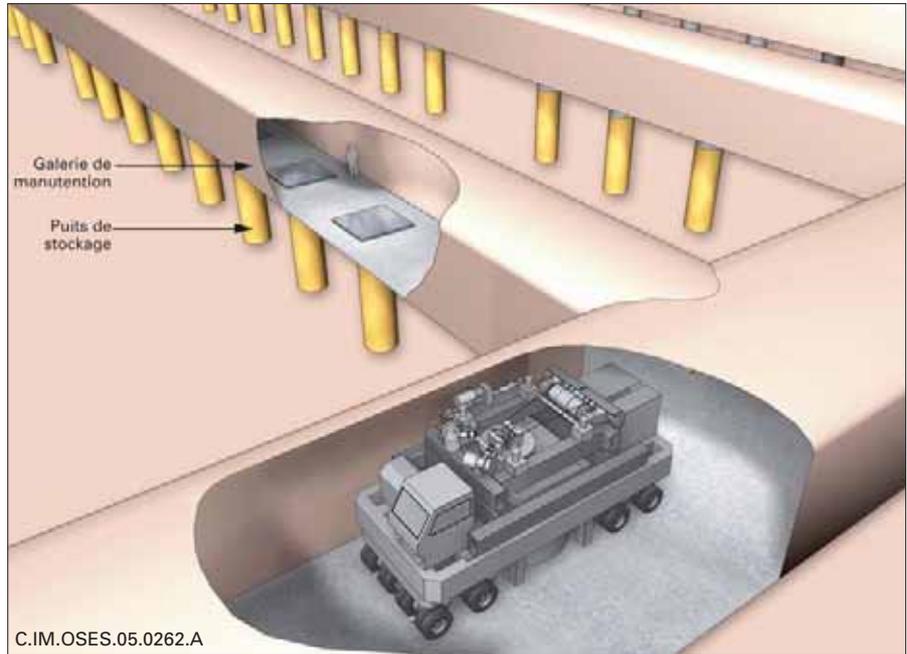
Conteneur en cuivre étudié par l'organisme suédois SKB

Les installations de stockage

conteneur en cuivre retenu en Suède et en Finlande. Des expériences au laboratoire suédois d'Äspö testent actuellement ce concept en grande nature.

Un environnement physico-chimique favorable aux colis

Les alvéoles C et CU sont dotées d'une barrière d'argile gonflante qui limite les contacts chimiques entre les colis et l'eau provenant du granite et met à l'abri de la petite fracturation. Les matériaux qui composent le stockage (béton, acier ou cuivre des colis, argile gonflante, remblais et scellements) offrent un environnement physico-chimique favorable aux colis et à la rétention des substances radioactives.



Concept de stockage de déchets C en milieu granitique

Une architecture qui limite les effets de la chaleur

Le granite est une roche résistante. Les galeries et les alvéoles sont conçues pour assurer leur stabilité mécanique à long terme.

Pour maîtriser les conséquences de la chaleur produite par les colis C et CU, on limite la température maximale à 90°C pour les barrières ouvragées en restreignant le nombre de colis par alvéole et en écartant les alvéoles.

A quoi ressemblerait une alvéole de stockage dans le granite ?

La solution proposée pour l'alvéole B est un tunnel horizontal où les colis sont empilés sur plusieurs rangées. Sa longueur (70 à 200 mètres) est adaptée à la fracturation du granite. Sa hauteur est d'une dizaine de mètres et sa largeur varie de 10 à 20 mètres. Les colis sont manipulés à distance et placés dans l'alvéole à travers un sas de sécurité. A la fermeture de l'alvéole, le sas est remblayé et la galerie d'accès scellée par un bouchon en argile gonflante qui fait obstacle à l'eau. Un principe similaire est étudié au Japon.

Pour les déchets C, le principe du puits vertical (12 mètres de long et 2 mètres de diamètre) a été retenu. Ce puits, qui accueille entre deux et cinq colis selon la chaleur, débouche vers le haut sur une galerie. Une barrière d'argile gonflante est placée entre les colis et la roche.

Comment s'organiseraient les galeries ?

Les tunnels sont implantés à plusieurs dizaines de mètres de distance des failles conductrices d'eau, tandis que le stockage sur deux niveaux permet d'utiliser la roche la moins perméable entre les failles.

Un stockage dans le granite est-il sûr et réversible ?

Les principes de sûreté et de réversibilité d'un stockage dans le granite sont similaires à ceux d'un stockage dans l'argile. A ce stade, en l'absence de site, l'évaluation de sûreté détaillée ne peut être conduite. Toutefois, les études n'ont identifié aucun élément réhibitoire vis-à-vis de la sûreté à long terme d'un stockage dans le granite. Pour répondre à l'engagement de réversibilité, il présente des garanties analogues à celle d'un stockage dans l'argile.

Un bilan d'étape, des horizons ouverts

Quinze années de progrès considérables dans le domaine de la recherche

Le stockage en couche géologique profonde est étudié depuis les années 1960 dans les pays occidentaux. Depuis la loi de 1991, les recherches ont beaucoup progressé en France et toutes les compétences se sont mobilisées pour produire des bilans scientifiques solides. Dans tous les domaines d'étude, la moisson de résultats a été particulièrement riche pour donner une vision précise des propriétés de tous les composants du stockage.

Les atouts du site de Meuse/Haute-Marne

Dans le cas de l'étude du milieu argileux, des investigations très poussées ont été réalisées pendant plus de 10 ans sur le site de Meuse/ Haute-Marne. Le laboratoire souterrain a produit des données importantes et constitue un atout précieux pour compléter les résultats déjà acquis, si on le souhaite.

En parallèle du programme conduit sur le sol français, les travaux menés dans les laboratoires souterrains étrangers ont permis de valider la démarche d'analyse de l'Andra.

Des scientifiques de haut niveau mobilisés

L'Andra a mobilisé les meilleurs laboratoires existant au plan français et international dans chaque domaine. La production des résultats a été discutée selon les exigences du monde académique et dans une logique d'excellence. Il en résulte une garantie sur la qualité des travaux.

Une évaluation externe régulière

L'Andra a eu recours à des experts extérieurs pour confronter ses recherches aux meilleures pratiques internationales. En 2002/2003, des experts internationaux ont passé en revue les résultats d'un dossier scientifique produit pour l'argile

et ont formulé des conclusions très encourageantes. Leurs recommandations ont été intégrées dans les *Dossiers Argile et Granite 2005*.

Les résultats de l'Andra et de ses partenaires sont publiés dans les revues scientifiques internationales et ainsi soumis à l'examen critique de la communauté scientifique.

La faisabilité du stockage dans l'argile est acquise

Des conditions favorables sur le site de Meuse/Haute-Marne

La couche du Callovo-Oxfordien réunit des propriétés très intéressantes, conformes à ce qui est attendu pour la conception d'un stockage en milieu argileux. Ces propriétés sont a priori réunies sur une zone de plus de 200 km².

Les études d'ingénierie, guidées par des choix prudents, ont défini des concepts de stockage simples et robustes qui sont adaptés aux caractéristiques de la couche argileuse.

La réversibilité : une priorité démontrée

L'Andra a développé une approche qui dépasse la seule possibilité de retirer les colis. Elle peut être définie comme la possibilité d'un pilotage progressif et flexible du stockage par étapes pour laisser aux générations futures une liberté de décision. Aussi, l'Andra a retenu de ne pas fixer a priori de durée à la réversibilité.

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. Mais il est également possible de le fermer progressivement, afin qu'il évolue de manière sûre sans intervention humaine.

Pas d'impact significatif sur l'environnement

Un acquis majeur des recherches est d'avoir bâti une histoire du stockage sur les prochaines centaines de milliers d'années afin de comprendre l'évolution du système, ainsi que les risques et les incertitudes correspondantes.

L'analyse a montré que les objectifs de sûreté étaient remplis. Les choix effectués, prudents, voire pessimistes, permettent de disposer de marges de sûreté importantes. Ces conclusions valent non seulement en situation normale, mais aussi dans des configurations altérées : défaillance de composants du stockage ou intrusion à l'intérieur de ce dernier.

Les conséquences pour l'homme et l'environnement sont conformes aux normes et recommandations en vigueur, avec des marges importantes.

Un bilan d'étape, des horizons ouverts



Laboratoire de recherche de Meuse/Haute-Marne

Un stockage dans le granite est envisageable

Les études sur le granite ont montré qu'un stockage dans les massifs granitiques français ne présentait pas de caractère rédhibitoire. En l'absence de site identifié, l'analyse se fonde sur la conception d'architectures génériques. Différentes options techniques possibles pour un stockage réversible ont été étudiées.

Les travaux s'appuient largement sur la Suède et la Finlande qui développent un programme de stockage dans le granite. De nombreuses expériences ont été menées en partenariat dans les laboratoires étrangers.

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.

Un bilan d'étape, des horizons ouverts

Après 2006 : quelles perspectives pour les recherches sur l'argile ?

Le programme de recherche mené sur les 15 dernières années a réuni les éléments permettant de répondre à la question de la faisabilité de principe du stockage dans l'argile. Toutefois, des incertitudes demeurent.

Sans préjuger des décisions que la représentation nationale jugera opportun de prendre, quelques éléments sont nécessaires pour situer les perspectives ouvertes par les résultats des recherches :

- les expériences ont été conduites sur des durées brèves. Une légitime prudence implique de laisser les dispositifs expérimentaux poursuivre l'acquisition de connaissances au cours des prochaines années,
- les ouvrages de stockage n'ont pas été testés en vraie grandeur. Il serait utile de réaliser des prototypes d'alvéoles au cœur de la roche. Un travail de consolidation de l'ingénierie serait également nécessaire si l'on souhaite s'orienter peu à peu vers une finalité industrielle,

- l'étude approfondie de la zone de plus de 200 km² autour du site de Meuse/Haute-Marne n'a pas été réalisée ; la question de la localisation d'un éventuel stockage au sein de cette zone appelle des travaux complémentaires,

- enfin, certains éléments du stockage ont été conçus au moyen de modèles simplifiés et particulièrement pessimistes. Dans le cadre d'une démarche plus finalisée, il serait intéressant de quantifier les marges de sûreté et de réduire les incertitudes qui demeurent.

Si les évaluations devaient confirmer la pertinence des résultats de l'Andra et si la représentation nationale souhaite poursuivre les travaux sur le stockage en couche géologique dans l'argile, l'Andra pourrait continuer ses travaux dans une perspective finalisée.

Dans un premier temps, on passerait de la phase actuelle de faisabilité de principe à une phase de développement qui pourrait s'étendre sur une période d'environ cinq années. Cette phase permettrait de répondre aux éventuelles questions

soulevées par les évaluateurs en 2006 et de se focaliser sur la mise en œuvre technologique.

Il s'agirait aussi de réunir les éléments nécessaires à la localisation d'une éventuelle installation de stockage. Cette reconnaissance passerait, par exemple, par une campagne sismique sur une large zone. Le laboratoire de Meuse/Haute-Marne serait, quant à lui, un outil essentiel pour poursuivre l'acquisition de données et conduire des essais à caractère technologique directement au sein de la couche.

Cette phase pourrait se conclure par un examen d'ensemble. Dans l'hypothèse où les résultats scientifiques et techniques feraient l'objet d'une évaluation favorable, il serait alors possible de passer à un stade de développement industriel. Afin de donner un ordre de grandeur, le déroulement d'une telle démarche pourrait déboucher sur une installation industrielle de stockage à l'horizon 2025.

Crédit Photos :

p. 2
Studio Durey

p. 3
Haut : Cogema
Bas : CEA

p. 4
Les Films Roger Leenhardt
Haut et bas

p. 6
Graphix Images

p. 7
Gauche : Graphix Images
Droite : Philippe Demail
En bas : Andra

p. 8
Graphix Images

p. 9
OCDE – AEN

p. 11
Coupe du laboratoire : Andra
Gauche : Andra
Centre : Graphix Images
Droite : Philippe Demail

p. 13
Gauche : Philippe Demail
Centre : Graphix Images

p. 15
T. Duvivier

p. 16
T. Duvivier

p. 28
SKB

p. 31
Droite : H. Pasteau
Gauche : Andra

p. 32
SKB

p. 35
Graphix Images

Les collections de l'Andra



Les Essentielles

En quelques pages, la collection « Les Essentielles » propose des explications simples et illustrées pour découvrir les déchets radioactifs et l'Andra.



Les Références

Références en terme de méthodes, d'états des recherches, ou d'activités de l'Agence : cette collection, à palette large, offre des informations variées et techniques, par exemple sur la localisation des déchets radioactifs.



Les Périodiques

Régulièrement, l'Andra publie des brochures relatives au suivi de l'environnement de ses Centres de stockage et de recherche : elles sont disponibles dans cette collection, ainsi que les différents journaux de site.



Les Découvertes

Vidéos, CD-Roms, images de synthèse, certaines images valent parfois mieux qu'un long discours. La collection « Les Découvertes » permet à un large public de comprendre, en images, les principes de la gestion des déchets radioactifs.



Sciences et Techniques

Faire le point sur les connaissances, présenter les recherches en cours, ainsi que les méthodes et démarches de l'Agence. C'est l'objectif de la collection « Sciences et Techniques ». Elle propose à un public averti des synthèses et des monographies, publiées sous l'égide de l'Andra et en partenariat avec d'autres institutions scientifiques.



Les Rapports

Dans la collection « Les Rapports », des bilans, rapports et actes de colloque permettront à un public averti de suivre la progression des recherches de l'Agence.



Pratiques industrielles

Cette collection propose des documents consacrés aux méthodes de prise en charge et de gestion des déchets radioactifs.



ANDRA

Agence nationale
pour la gestion des déchets radioactifs