

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



Galerie d'expérimentations (-445 m) du laboratoire souterrain de Meuse / Haute-Marne.

### Une mission nationale

Les déchets radioactifs de haute activité à vie longue (HAVL) issus de la production d'électricité, du traitement des combustibles usés et des activités de recherche et de défense sont actuellement entreposés de manière sûre dans des installations industrielles.

La loi du 30 décembre 1991 a engagé un programme de recherches visant à définir des modes de gestion à long terme pour ces déchets. Elle a confié à l'Andra, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, la mission d'évaluer la faisabilité d'un stockage en formation géologique profonde, solution également considérée par de nombreux autres pays (Finlande, Suède, Belgique, Suisse, Etats-Unis) et jugée particulièrement robuste du point de vue de la sûreté par les instances internationales comme l'AIEA<sup>1</sup>. Régulièrement soumis à l'examen

de la Commission nationale d'évaluation, instance indépendante créée par la loi, les résultats de ces recherches constituent le socle du débat parlementaire prévu en 2006.



Schéma d'un colis primaire de déchets C vitrifiés R7T7.

> **Un stockage** consiste en un ensemble de cavités élémentaires (les alvéoles) creusées dans la roche (formation hôte). Regroupées par grands ensembles (modules), ces alvéoles accueillent les colis de déchets. Les modules sont reliés par des galeries, elles-mêmes desservies par des voies d'accès reliées à la surface par des puits.

### > Une bonne connaissance des déchets à prendre en charge

L'Andra a recensé les déchets et évalué leur production future par les installations actuelles sur la base de quatre scénarios définis avec les producteurs de déchets (EDF, AREVA, CEA) et représentatifs des stratégies possibles en matière de retraitement des combustibles usés (de la poursuite à l'arrêt).

On distingue deux types de déchets :

> **les déchets C** de haute activité (1 % du volume total et 96 % de la radioactivité) : issus du retraitement des combustibles usés, ils sont confinés dans une matrice en verre et coulés dans des fûts en inox. Ils dégagent une forte chaleur,

> **les déchets B** de moyenne activité à vie longue, les plus abondants : conditionnés par compactage ou dans des matrices de bitume ou de béton, ils sont placés dans des fûts en béton ou en acier.

La radioactivité des déchets décroît dans le temps.

Les études ont considéré l'éventualité d'un stockage des combustibles usés non retraités bien que ces derniers ne soient pas des déchets et qu'il soit prévu de les retraiter dans les prochaines années.

(1) Agence internationale de l'énergie atomique

# Argile et granite : deux programmes de recherches

## > Pour le granite

L'Andra ne disposant pas de laboratoire souterrain, ses équipes ont participé aux expérimentations dans les laboratoires suédois (Åspö), suisse (Grimsel) et canadien (lac du Bonnet) ainsi que sur le site d'Olkiluoto (Finlande). Ces travaux n'ont pas évalué la faisabilité d'un stockage conçu pour souscrire aux spécificités d'un site particulier : ils ont apprécié l'intérêt du milieu granitique et proposé des concepts "génériques", susceptibles de répondre, dans le contexte géologique français, aux objectifs de sûreté à long terme. De même, l'analyse de sûreté ne prétend pas porter de conclusion précise sur les performances du système étudié par rapport à des objectifs quantifiés de radioprotection, elle vise à identifier et traiter les questions essentielles et à vérifier qu'aucune des problématiques examinées ne présente de caractère rédhibitoire.

L'Andra a étudié la faisabilité d'un stockage de déchets HAVL en France dans l'argile et dans le granite. Les résultats de ces travaux sont présentés dans les dossiers "Argile 2005" et "Granite 2005".

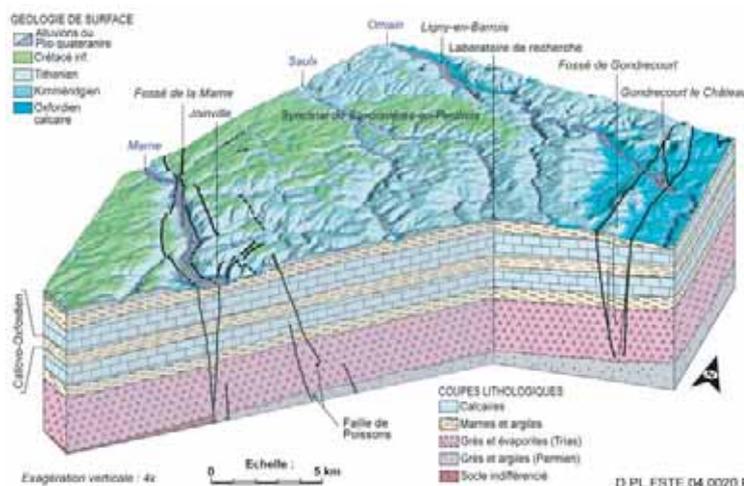
Les études portent sur quatre domaines complémentaires :

- > l'acquisition de données sur les colis de déchets, le comportement des matériaux, les milieux argileux et granitiques,
- > la conception du stockage : conditionnement des déchets, architecture et intégration dans un site géologique, modes d'exploitation, réversibilité,
- > l'analyse du comportement à long terme du stockage et la modélisation de son évolution thermique, mécanique, chimique et hydraulique,
- > les analyses de sûreté à long terme.

le Callovo-Oxfordien. Depuis 1994, l'Andra a réalisé 27 forages profonds sur des distances de plus de 15 kilomètres, extrait 2,3 km d'argilites des forages, prélevé plus de 30 000 échantillons. L'observation directe du Callovo-Oxfordien et les expérimentations in situ se poursuivent depuis 2004 dans les puits et dans près d'une centaine de mètres de galeries. Le laboratoire suisse du Mont Terri est également un outil essentiel avec son argile similaire à celle de Bure.

## > Pour le stockage en milieu argileux

L'Andra a conduit ses études dans son laboratoire souterrain de Meuse / Haute-Marne, créé par le décret d'août 1999 et implanté à 490 m de profondeur dans une roche argileuse dure (argilite) âgée de 155 millions d'années,



La formation du Callovo-Oxfordien et ses encaissants.

## > De nombreuses coopérations, une évaluation internationale

L'Andra a conduit ces deux programmes de recherches en partenariat avec ses homologues étrangers, Nagra en Suisse,

Enresa en Espagne, BGR en Allemagne, Ondraf en Belgique, etc. , ainsi qu'avec la communauté scientifique française (BRGM, CEA, CNRS, IFP, INERIS, INPL, Ecole des Mines,...) et internationale. Plus d'une centaine de laboratoires dans le monde y ont été associés.

L'Andra soumet par ailleurs ses travaux à l'évaluation internationale, ainsi en 2003 un groupe d'experts internationaux mandatés par l'OCDE/AEN a examiné le dossier de synthèse sur l'argile produit en 2001 et porté un regard positif sur les travaux accomplis.

# Le site de Meuse / Haute-Marne

## > Une formation argileuse favorable au stockage

En dix ans d'études, l'Andra a acquis des données suffisantes pour considérer que le Callovo-Oxfordien du site de Meuse / Haute-Marne présente des caractères favorables à un stockage de déchets HAVL.

Très faiblement perméable, homogène sur une grande surface, cette formation argileuse située à une profondeur moyenne de 500 mètres n'est affectée par aucune faille. Elle se situe dans une zone de très faible sismicité. Par ailleurs, grâce à sa profondeur elle ne sera pas affectée par les évolutions climatiques à venir (érosion). Les circulations

d'eau y sont quasi nulles et très lentes. Elle se déforme peu et réagit bien aux perturbations dues au creusement minier et aux impacts thermique et chimique des déchets et matériaux du stockage, ce qui garantit le maintien de ses propriétés de confinement sur de très longues durées. Elle bénéficie d'un environnement géologique stable et les formations qui l'encadrent présentent, elles aussi, d'assez faibles perméabilités et des écoulements lents. Ces caractéristiques favorables se retrouvent sur une zone de 200 km<sup>2</sup> au nord et à l'ouest du laboratoire.



Laboratoire de recherche de Meuse / Haute-Marne.

# Les architectures de stockage en formation argileuse

## > Des options robustes, un système modulaire spécialisé par type de déchets

Pour stocker et gérer de manière sûre et réversible les différents types de colis (B, C et, éventuellement, combustibles usés), l'Andra a retenu des options simples et robustes et propose une architecture modulaire et flexible, constituée de briques élémentaires ou modules de stockage.

Pour simplifier l'exploitation et en accroître la robustesse, les colis de déchets fabriqués par les producteurs

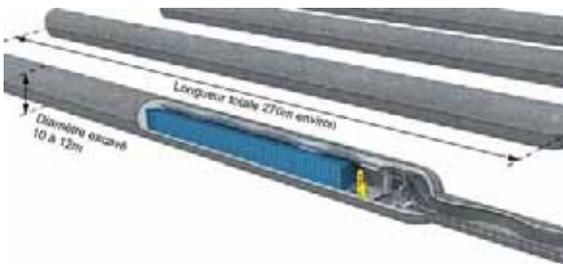
sont placés dans des conteneurs de béton (déchets B) ou d'acier (déchets C et combustibles usés). Positionné sur un seul niveau, au milieu du Callovo-Oxfordien, le stockage est organisé en zones distinctes selon les types de colis, séparées par 250 mètres d'argilite et subdivisées en modules.

Le profil, généralement circulaire, des ouvrages, leur dimensionnement, leur disposition en cul de sac, leur fermeture par des scellements peu perméables, le remblaiement des galeries en fin d'exploitation ainsi que le choix des matériaux (béton, acier, argile) visent à réduire les perturbations dans la formation

géologique, à maîtriser les circulations d'eau, puis à limiter et retarder le relâchement des éléments radioactifs et leur migration.

## > Une réversibilité assurée pour au moins trois siècles

Intégrée dès la conception du stockage, l'exigence de réversibilité conduit à privilégier des matériaux durables, prévoir des dispositifs pour retirer les colis. La reprise des déchets est possible par simple inversion du processus de mise en place sur des durées pluriséculaires.



Dotée d'un revêtement en béton, l'alvéole de stockage B mesure 250 m utiles de long pour un diamètre excavé de 12 m. Elle accueille des colis en béton regroupant les colis primaires et empilés sur plusieurs niveaux.

# Deux principes directeurs Trois fonctions majeures

## Sûreté à long terme et réversibilité sont les principes guidant la conception du stockage.

L'objectif d'un stockage géologique est de protéger les personnes et l'environnement d'éventuelles atteintes liées aux déchets radioactifs en interposant plusieurs barrières aptes à confiner la radioactivité durant plusieurs centaines de milliers d'années : colis abritant les déchets, installations du stockage, milieu géologique.

La démarche de sûreté prend ainsi en compte de très longues durées et oriente les choix vers les solutions les plus robustes, à même d'assurer les trois fonctions majeures du stockage :

- > limiter le relâchement des éléments radioactifs et les immobiliser dans le stockage,
- > retarder et atténuer dans le temps la migration de ceux qui finiraient par sortir du stockage,
- > empêcher les circulations d'eau, à la fois agent de dégradation des colis et vecteur de migration des radionucléides qu'ils contiennent.

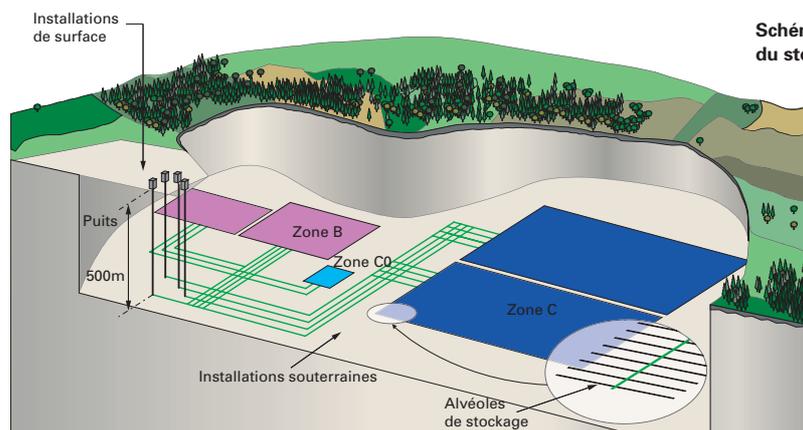


Schéma de principe du stockage géologique.

Ces fonctions sont assurées par des barrières et des composants différents et redondants.

L'approche de la réversibilité proposée par l'Andra consiste à permettre le pilotage flexible et par étapes du stockage. L'objectif est de laisser aux générations futures une liberté de décision quant aux choix de gestion. La conception modulaire du stockage vise à laisser les choix aussi ouverts que possible. La réversibilité se concrétise par la possibilité

de retirer les colis stockés, mais aussi d'agir sur le processus de stockage et d'en faire évoluer la conception. Un programme d'observation a été élaboré pour veiller à la faisabilité technique d'un retour en arrière. Les études ont montré que la réversibilité pourrait être assurée pendant une période minimale de deux à trois siècles sans autre intervention que les opérations classiques de maintenance et de surveillance.



Laboratoire d'Äspö (Suède).

## L'évaluation de sûreté

### > La démonstration de la robustesse du concept de stockage en formation argileuse

Pour vérifier la robustesse des solutions proposées, l'Andra a simulé l'évolution du stockage à très long terme, au travers d'une analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS), puis testé les limites de validité de cette représentation par une analyse de sûreté. Celle-ci définit l'histoire simplifiée de l'évolution du stockage, ou scénario d'évolution normale (SEN). Elle englobe, avec des choix très prudents, l'éventail des situations probables. L'Andra a aussi examiné des scénarios intégrant des événements très peu probables (invasion, défaillance des fonctions de sûreté).

### > Des calculs projetés sur 1 million d'années

L'impact du stockage sur l'homme et l'environnement, qui doit, selon le guide méthodologique publié par l'Autorité de sûreté nucléaire (la Règle Fondamentale de Sûreté III.2.f), être inférieur à 0,25 millisievert/an en situation normale

(soit 1/4 de la dose due aux expositions d'origine non naturelle actuellement admise pour le public et environ 1/10<sup>e</sup> de la dose annuelle due à la radioactivité naturelle), a ensuite été calculé à l'aide de modèles. L'Andra a prolongé ses calculs sur un million d'années, conformément à la pratique internationale.

L'analyse montre que dans toutes les situations envisagées, normales ou altérées, les trois fonctions de sûreté principales sont remplies par le dispositif proposé sans dépendre de manière excessive d'un seul de ses composants : tous contribuent de manière sensible, mais non prépondérante à la sûreté d'ensemble. La formation géologique du Callovo-Oxfordien joue, en toute situation, un rôle majeur pour immobiliser les radionucléides et pour retarder et atténuer leur migration vers l'environnement.

Dans tous les scénarios, même accidentels ou altérés, les performances du stockage répondent, avec des marges importantes, aux objectifs de dose recommandés par la RFS III.2.f. Le stockage constitue donc un concept robuste, y compris dans des situations peu vraisemblables, cumulant les caractéristiques défavorables.

### > Le milieu granitique : des propriétés intéressantes

En l'absence de site spécifique d'étude, les principes de conception retenus par l'Andra se fondent sur des travaux menés dans les laboratoires étrangers et sur l'analyse typologique de 78 zones granitiques de plus de 20 km<sup>2</sup>, situées dans le Massif central et le Massif armoricain, à l'écart des grandes failles.

Les architectures proposées s'adaptent à la fracturation des granites et tirent parti de la très faible perméabilité et de la résistance de la roche non fracturée. Colisage des déchets en surconteneurs, séparation des colis en zones et modules spécialisés, modularité de l'exploitation et de la fermeture, scellement et remblaiement des ouvrages, dispositions pour favoriser la réversibilité : nombre d'options ont été transposées de l'étude des architectures en milieu argileux.

En l'absence de site particulier, l'analyse de sûreté n'a pas estimé l'impact du stockage en termes de dose à laquelle serait exposé le public : elle a permis de préciser le rôle et les performances des composants du stockage vis-à-vis des fonctions de sûreté, d'identifier et de traiter les incertitudes. Elle souligne la pertinence d'un principe d'architecture adapté à la fracturation du granite et l'efficacité des composants ouvrages. Une incertitude forte porte sur la possibilité de trouver des sites avec des blocs de granite sain de taille suffisante en dehors du réseau de fractures.

### > Conclusion

Au terme des recherches, la faisabilité de principe du stockage en formation argileuse apparaît acquise.



Agence nationale  
pour la gestion des déchets radioactifs