

Sommaire

Introduction

p.04> L'évaluation de la faisabilité d'un stockage géologique de déchets de haute activité et à vie longue : le cadre des recherches menées par l'Andra

Chapitre 1

p.13> La démarche de conception d'un stockage sûr et réversible

Chapitre 2

p.37 > Les colis

Chapitre 3

p.55 > Le milieu géologique : le site de Meuse/Haute-Marne

Chapitre 4

p.105>Le stockage - Les installations

Chapitre 5

_p.143> L'exploitation réversible du stockage

Chapitre 6

p.167 > Le comportement et la sûreté à long terme du stockage

p.224 > Conclusion

1p.230> Glossaire

Introduction

I. L'évaluation de la faisabilité d'un stockage géologique de déchets de haute activité et à vie longue : le cadre des recherches menées par l'Andra

I.1 La loi du 30 décembre 1991

La loi du 30 décembre 1991 sur la gestion des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue (HAVL), reprise dans l'article L.542 du Code de l'environnement, a confié à l'Andra, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, la mission d'évaluer la possibilité d'un stockage des déchets en formation géologique profonde, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains (axe 2 de la loi). Par la suite, le Gouvernement a demandé à l'Andra d'inscrire ses travaux dans une logique de réversibilité. De son côté, le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) pilote les travaux relatifs à la séparation et à la transmutation des déchets HAVL (axe 1 de la loi) ainsi qu'à leur entreposage et à leur conditionnement (axe 3).

Dans ce cadre, des recherches ont été conduites, avec des outils et à des degrés de maturité différents, sur deux types de milieu géologique : l'argile et le granite. Le présent rapport constitue une synthèse des travaux de l'Andra pour l'étude d'un stockage géologique en formation argileuse. Un autre rapport détaille les acquis dans le domaine des milieux granitiques.

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

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

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

La mission de l'Andra

Elle recouvre :

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

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

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

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

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

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

II.1 L'acquisition des connaissances sur le milieu géologique

Depuis 1991, l'Andra a engagé un important programme de recherches pour l'étude du stockage en formation argileuse. Un élément clé est l'étude du site de Meuse/Haute-Marne et d'une roche argileuse dure (argilite) âgée d'environ 155 millions d'années, le Callovo-Oxfordien, située à une profondeur de 400 à 600 m.



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

Les travaux sur le site et dans le secteur du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne ont permis de recueillir de nombreuses informations scientifiques et d'acquérir une compréhension fine de l'environnement géologique de ce site pour s'assurer que la couche argileuse du Callovo-Oxfordien présente les propriétés favorables attendues, et pour évaluer son comportement à long terme, notamment l'effet des perturbations que l'implantation d'un stockage de déchets lui ferait subir. Le but de la démarche n'est pas de positionner un éventuel stockage sur un site précis ; la question de la localisation d'un stockage apparaît en effet prématurée. Aussi, l'Andra s'est uniquement assurée de la transposabilité à une zone plus large des résultats obtenus sur le site du laboratoire. Cette transposabilité est le gage que les résultats des études ne sont pas dépendants des spécificités d'une localisation particulière.

Ainsi, 27 forages profonds ont été réalisés depuis 1994 et 2 300 m de carottes d'argilites extraits (sur 4 200 m de forages carottés). L'Andra a prélevé plus de 30 000 échantillons (dont 7 300 fluides) et analysé 5 300 échantillons de roche. L'observation directe de la formation-hôte du Callovo-Oxfordien a démarré en mars 2004 dans les puits. Par ailleurs, 40 m de galeries sont en activité scientifique depuis novembre 2004, à 445 m de profondeur, équipés de 350 capteurs pour des expérimentations *in situ*. De plus, plus de 50 m de galeries ont été creusés à la profondeur de 490 m.

L'acquisition des données résulte aussi de nombreuses études complémentaires en laboratoires de surface, en France ou à l'étranger, ou en laboratoires souterrains de recherche comme celui du Mont Terri (Suisse), où la roche présente des caractéristiques semblables à celle des argilites du Callovo-Oxfordien, ou encore celui de Mol (Belgique).

II.2 Quatre axes de recherche

Outre les travaux visant la caractérisation du milieu géologique, les études et recherches portent sur quatre domaines complémentaires :

- l'acquisition de données : colis de déchets, comportement des matériaux (colisage des déchets, barrières ouvragées, soutènements...). L'objectif est de comprendre les phénomènes physiques et chimiques qui gouverneraient l'évolution, sur de très longues durées, du stockage et de son environnement,
- la conception du stockage : conditionnement des déchets, architecture et intégration du stockage dans un site géologique, modes de réalisation et d'exploitation, gestion des colis de déchets, possibilités de fermeture du stockage... L'objectif est de proposer une architecture de stockage prenant en compte la réversibilité et qui soit robuste au plan de la sûreté,
- le comportement du stockage et son évolution sous l'effet de l'interaction de ses composants. L'objectif est d'appréhender finement les phénomènes thermiques, mécaniques, chimiques et hydrauliques, de les modéliser et de les simuler numériquement,
- *les analyses de sûreté à long terme pour évaluer les performances* du stockage par rapport à l'objectif de protection de l'homme et de son environnement. L'objectif est d'évaluer l'impact éventuel d'une installation et d'apprécier la robustesse de sa conception.

II.3 Une mobilisation importante de la communauté scientifique française et internationale

Pour ses études et recherches sur le stockage, l'Andra a développé de multiples collaborations scientifiques avec des partenaires français (Bureau de recherches géologiques et minières, CEA, CNRS, Institut national polytechnique de Lorraine, Institut français du pétrole, Ecole des Mines de Paris, Institut national de recherche sur les risques industriels...) et étrangers, ainsi que des échanges avec les agences ou organismes homologues à l'étranger : Nagra (Suisse), Enresa (Espagne), BGR (Allemagne), Ondraf (Belgique), SKB (Suède). Une centaine de laboratoires a été régulièrement associée aux recherches et sept groupements de laboratoires ont été constitués par l'Andra autour des thématiques suivantes : corrosion des métaux, argile, béton, phénomènes couplés thermo-hydromécaniques, radionucléides, géomécanique et bio-géoprospective.

En outre, trois groupements de recherche (GDR) associent l'Andra au Programme sur l'aval du cycle électronucléaire (PACE) conduit par le CNRS : FORPRO, qui rassemble une quarantaine de laboratoires du CNRS pour l'étude du milieu géologique, MOMAS pour la simulation numérique et PRACTIS/PARIS pour la physico-chimie des actinides.

L'Andra participe aussi de manière active aux projets des V^e et VI^e Programmes cadres de recherche de l'Union européenne (Clipex, Ecoclay, Reseal III, Febex, Crop, SFS, Modex Rep, Bioclim, Esdred...).

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile



Présentation de résultats sur l'argile dans les barrières de confinement naturelles et ouvragées pour le stockage des déchets radioactifs au colloque international de Tours en 2005

La politique scientifique et le rôle de l'Andra

Afin de conduire ses recherches, l'Andra mobilise des compétences scientifiques pluridisciplinaires, notamment dans les domaines des sciences de la terre, des matériaux, de l'environnement, du calcul et de la modélisation, de la mesure et de la surveillance. L'Agence identifie les grandes questions scientifiques relatives à la gestion des déchets radioactifs, évalue les principaux enjeux, élabore les programmes de recherche nécessaires en associant très largement les partenaires scientifiques compétents et en leur permettant de hiérarchiser les priorités en matière de recherche sur la gestion des déchets. Elle suscite, constitue et anime les réseaux scientifiques, en mobilisant les compétences adéquates et en développant relations et partenariats avec le monde universitaire ainsi qu'avec les grands organismes de recherche et les acteurs industriels. Il convient de souligner l'importance du partenariat avec le CNRS, dans le cadre des groupements de recherche (GDR) rassemblés au sein du programme sur l'aval du cycle électronucléaire (PACE). Par ailleurs, une politique de soutien aux thèses de doctorat et de post-doctorat est mise en œuvre. En tant qu'agence de programme, l'Andra a un rôle de fédérateur des efforts de la communauté scientifique, de mobilisation de cette dernière et de promotion des thèmes de recherche pertinents. Les quinze années depuis 1991 ont été marquées par un investissement sans cesse accru de la communauté scientifique autour des thématiques mises en exergue par l'Andra. Cela a également stimulé une ouverture intellectuelle très productive en termes d'innovation et de croisement des compétences.

II.4 L'architecture du Dossier 2005

L'étude de faisabilité d'un stockage s'attache à évaluer les conditions dans lesquelles il serait possible de construire, exploiter, gérer de manière réversible, fermer et surveiller un stockage, puis de le laisser évoluer sans intervention humaine, sans qu'à aucun moment la sécurité des personnes et la protection de l'environnement ne soient compromises.

Evaluer cette faisabilité impose de bien comprendre les propriétés et les évolutions des différents composants du stockage, jusqu'à des échelles de temps très longues : colis, ouvrages, milieu géologique. Cette maîtrise des connaissances permet d'asseoir sur des bases scientifiques fortes un jugement sur la faisabilité du stockage au regard des objectifs de réversibilité et de sûreté qui lui sont assignés.

· Cinq « référentiels de connaissances »

L'Andra a structuré l'acquisition des connaissances autour de cinq référentiels :

- « référentiel du site de Meuse/Haute-Marne » qui réunit les données relatives au milieu géologique et à la biosphère (formation d'accueil du stockage et son environnement, voies de circulation ou de transfert des radionucléides dans l'environnement, études sur les biosphères actuelles et futures...),
- « référentiel des matériaux d'un stockage » qui regroupe les données relatives au comportement des matériaux utilisés pour la construction des architectures (aciers, bétons, argiles et matériaux de remblayage),
- « référentiel du comportement des radionucléides et des toxiques chimiques » qui rassemble les données relatives au comportement physique et chimique des radionucléides et toxiques chimiques,
- « référentiel du comportement des colis de déchets de haute activité et à vie longue » qui synthétise les connaissances et modèles sur le comportement des déchets en environnement de stockage,
- « référentiel de connaissances et modèle d'inventaire des colis de déchets de haute activité et à vie longue » qui recense tous les déchets HAVL produits et à produire par les installations nucléaires existantes.

Trois « tomes »

L'Andra a structuré la synthèse des résultats acquis autour de trois tomes renvoyant chacun à un des aspects du processus d'analyse.

- L'architecture et la gestion du stockage géologique



L'Andra propose une architecture de stockage à la fois possible au regard des attentes et réaliste d'un point de vue industriel. Fondées sur les connaissances et la technologie disponibles, les options techniques étudiées, choisies aussi simples et robustes que possible, montrent que des solutions existent. Au stade de l'étude de faisabilité, ces options ne sauraient être considérées comme optimisées : elles sont susceptibles d'évoluer si une suite était donnée aux travaux actuels au-delà de 2006.

Cette architecture constitue la base sur laquelle a été analysée la sûreté du stockage, notamment son comportement et son évolution aux différentes échelles de temps.

- L'évolution phénoménologique du stockage géologique



La conception et l'évaluation de sûreté d'un stockage reposent sur la compréhension des processus se déroulant au sein de ce dernier et de son environnement. Cette compréhension doit permettre de rendre compte de l'évolution des composants du stockage aux différentes échelles de temps puis, *in fine*, du relâchement éventuel et de la migration des radionucléides dans l'environnement, à l'échelle du million d'années.

- L'évaluation de sûreté du stockage géologique

Elle vise à examiner si les concepts de stockage étudiés respectent les objectifs de protection de l'homme et de l'environnement en évaluant le comportement du stockage au cours du temps. L'analyse de la sûreté à long terme consiste à :



- définir et représenter l'évolution la plus probable du stockage,
- examiner les risques de dysfonctionnement, leurs causes et leurs effets,
- retenir les situations de stockage et les phénomènes qui sont importants vis-à-vis des performances de sûreté, les traduire par des scénarios d'évolution normale ou altérée,
- quantifier ces scénarios par une modélisation simplifiée, mais représentative des phénomènes,
- évaluer les conséquences et l'impact de ces scénarios,

- identifier les facteurs de conception ou dispositions aptes à rendre plus robuste le concept de stockage.

Le développement itératif du projet permet de conduire à chaque étape un travail au regard de la sûreté qui vient en retour infléchir les études de conception et les besoins d'acquisition de connaissances.

II.5 Une démarche itérative

Conformément à la RFS III.2.f, qui stipule que « les objectifs quantitatifs pour les performances de confinement des différentes barrières ne pourront être valablement fixés qu'à l'issue d'un processus itératif, intégrant l'expérience acquise au cours de l'étude de la sûreté des stockages », l'Andra a mené ses études suivant une démarche itérative, au fur et à mesure que se précisaient les connaissances et l'architecture du stockage.

Cette démarche, qui intègre la sûreté dès les phases situées le plus en amont de la conception, permet d'orienter progressivement les choix vers des solutions offrant le plus de robustesse vis-à-vis des incertitudes de connaissances et d'introduire des mesures de prévention et de protection en regard des risques identifiés.

Chaque itération se caractérise par des acquisitions de connaissances et par l'étude de concepts d'architecture en cohérence avec ces connaissances. Ces dernières permettent d'appréhender le comportement des concepts étudiés au moyen de modélisations.

Ces éléments constituent la base d'une analyse de sûreté axée sur les fonctions à long terme du stockage, qui en constituent la spécificité, et sur sa sûreté opérationnelle. Les enseignements de l'analyse de sûreté deviennent alors une donnée d'entrée de l'itération suivante : incertitudes de connaissances qu'il conviendrait de réduire en priorité, orientations en matière de conception.



Trois itérations de cette nature ont été réalisées entre 1994 et 2005 (dossier de demande d'autorisation d'installation et d'exploitation en 1996, Dossier 2001, Dossier 2005)

Repères chronologiques

1992 *Travaux sur la conception du stockage* et mise en évidence des principales données de base : éléments du système, performances nécessaires, connaissances à acquérir.

1994-1996 *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. Sur le site de Meuse/Haute-Marne, l'Andra a réalisé trois forages, une campagne géophysique 2D et des cartographies.

1997 *Première sélection de concepts de stockage (« options initiales de conception »)* prenant en compte la disposition de chacun des deux sites.

1998 Etude des concepts de stockage sélectionnés pour répondre aux questions mises en évidence par les premières analyses de sûreté. Ces études aboutissent à *la sélection de concepts préliminaires* proposant un éventail très large de solutions techniques.

Décembre 1998 Décision du Gouvernement de retenir le site de Meuse/Haute-Marne pour accueillir un laboratoire. Définition du programme d'expérimentation de ce laboratoire.

1999-2001 Approfondissement de la connaissance du Callovo-Oxfordien sur le site de Meuse/Haute-Marne (campagne géophysique sismique 3D, forages, mesures sismiques...) et début du creusement du puits d'accès du laboratoire et du puits auxiliaire.

Fin 2001 Le Dossier 2001 Argile fait le point des connaissances acquises, teste les méthodes mises en œuvre, procède à une première vérification de sûreté des concepts préliminaires de stockage également analysés sous l'angle de leur réversibilité.

2002 A partir du Dossier 2001 Argile :

- élaboration du programme scientifique révisé Argile 2002-2005,
- sélection des concepts de stockage (colis et alvéoles) qui ont constitué une donnée de base des études d'ingénierie, de comportement et de sûreté menées de 2002 à 2005.

2003-2004 *Programmes FSP et FRF de forages* sur le site et le secteur d'études autour du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne.

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 et exploitation des galeries expérimentales à –490 mètres* à la base du puits auxiliaire.

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile

Dossier 2005 Argile

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile

La démarche de conception d'un stockage sûr et réversible

p.16 > 1. La démarche de sûreté

p.31 > 2. La réversibilité

La démarche de conception d'un stockage sûr et réversible

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

L'étude de la faisabilité d'un stockage de déchets HAVL en formation géologique profonde menée par l'Andra en s'appuyant sur les caractéristiques du site de Meuse/Haute-Marne s'attache à évaluer les conditions dans lesquelles on pourrait construire, exploiter, gérer de manière réversible, fermer, surveiller un site de stockage, puis le laisser évoluer sans aucune intervention humaine et sans qu'à aucun moment la sécurité des travailleurs, du public et la protection de l'environnement ne soient compromises. *La sûreté est ainsi au centre de la démarche de conception du stockage*.

Déchets HAVL et combustibles usés

- Deux types de déchets
- Les déchets de haute activité, dits déchets C. Il s'agit des résidus du traitement des combustibles usés déchargés des centrales de production d'électricité. Ces résidus sont coulés dans une matrice de verre en fusion (d'où leur nom de déchets vitrifiés). Ils représentent de très faibles volumes mais concentrent 96 % de la radioactivité résiduelle après traitement. Ils sont entreposés sur les sites de Marcoule et de La Hague,
- Les déchets de moyenne activité, dits déchets B. Il s'agit des déchets technologiques issus du processus de traitement des combustibles usés. Ils comprennent également des déchets issus d'activités de recherche ou, en très petite quantité, des objets fortement chargés en radioactivité naturelle (radium). Ils se présentent sous une grande diversité de forme (conditionnement dans du béton, du bitume ou sous forme métallique). Ils représentent l'essentiel du volume mais une faible part de la radioactivité. Ils sont principalement entreposés sur les sites de la Hague, Marcoule et Cadarache.

· Le cas particulier des combustibles usés

Les combustibles usés déchargés des centrales ne sont pas considérés comme des déchets. En effet, la stratégie de l'aval du cycle défini par l'électricien EDF prévoit leur traitement à l'usine COGEMA de La Hague. Toutefois, afin de couvrir d'éventuelles évolutions du cycle du combustible, il a été demandé à l'Andra de prendre également en compte dans ses études, à l'instar de ce qui se fait dans plusieurs autres pays, la possibilité du stockage direct des combustibles usés (dits CU). Des concepts spécifiques ont donc été développés pour ces matières. On distingue deux grands types de combustibles : ceux qui sont composés d'oxyde d'uranium (dits UOX), ceux qui sont à base d'un mélange d'oxyde d'uranium et de plutonium (dits MOX) qui recyclent le plutonium issu du traitement des combustibles usés (UOX).



Le processus du stockage

Les colis primaires de déchets sont constitués d'un emballage en métal ou en béton contenant des déchets radioactifs. Il en existe de nombreux types, suivant la nature des déchets.

Ces colis primaires sont transportés dans des emballages de transport, par rail et/ou par route depuis les centres de production de ces colis (usines de traitement du combustible, centrales électriques ou laboratoires de recherche) jusqu'au centre de stockage.

Au centre de stockage, les colis sont retirés des emballages de transport et placés en colis de stockage qui contiennent, dans leur enveloppe de béton ou de métal, un ou plusieurs colis primaires de même type. Le colis de stockage, entouré d'une hotte de protection biologique métallique, est descendu par un puits de descente et convoyé dans les galeries jusqu'à la zone de stockage. Dans cette zone, le colis est retiré de la hotte et placé dans une alvéole de stockage.

Dans un stockage réversible, le colis peut alors être géré de manière aussi simple que dans un entreposage. Si le choix en est fait, le stockage peut être fermé par étapes. Une première étape est le scellement de l'alvéole. Peu à peu, les alvéoles et les galeries de la zone de stockage, puis le centre de stockage seraient fermés suivant un processus progressif, contrôlé et réversible. La fermeture n'empêche pas un retrait des colis, mais la complexité croît avec l'évolution du niveau de réversibilité.



Schéma de principe d'une architecture de stockage : des cavités élémentaires (les alvéoles) creusées dans la roche en profondeur (formation-hôte ou d'accueil) accueillent les colis de déchets et sont regroupées par grands ensembles (modules). Ces derniers sont reliés entre eux par des galeries reliées à la surface par des puits d'accès. En surface existent des installations de support (accueil des colis, conditionnement, etc.).

Statuer sur la faisabilité d'un éventuel stockage renvoie à l'acquisition d'une conviction étayée, au regard d'un site spécifique, que :

- il existe des technologies pour mener à bien l'ensemble des phases de vie du stockage,
- leur mise en œuvre reste accessible (en particulier qu'elle n'impose pas un coût ou des besoins de développement rédhibitoires),
- le milieu géologique retenu présente des caractéristiques favorables pour contribuer à une gestion sûre,
- ces technologies permettent de réaliser, exploiter, fermer et laisser évoluer le stockage dans des conditions sûres et sur des échelles de temps allant jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années,
- l'évaluation de la sûreté de ces concepts, à court et long terme, peut être conduite avec une maîtrise suffisante.

Outre la sûreté en exploitation et à long terme, *la conception du stockage doit répondre à l'exigence de réversibilité*, étroitement liée à l'application du principe de précaution et prévue par la loi du 30 décembre 1991. La réversibilité renvoie à une gestion « prudente », par étapes successives, d'un éventuel stockage qui laisse les choix ouverts aux générations suivantes. Son étude impose de bien comprendre scientifiquement et techniquement l'évolution d'un stockage et de décrire les moyens d'action nécessaires pour conserver les possibilités d'un choix. *L'exigence de réversibilité se place aussi au centre des réflexions sur l'étude d'un éventuel stockage et complète les orientations de la règle fondamentale de sûreté (RFS III.2.f).*

RFS III.2.f « La protection des personnes et de l'environnement à court et long terme constitue l'objectif fondamental assigné à un centre de stockage de déchets en formation géologique profonde ».

Elle doit être assurée « sans dépendre d'un contrôle institutionnel sur lequel on ne peut pas se reposer de façon certaine au-delà d'une période limitée » (500 ans).

Le stockage dans ses différentes phases

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

1. La démarche de sûreté

L'approche de sûreté pour l'évaluation d'un stockage géologique de déchets HAVL présente plusieurs spécificités :

- la nécessité d'aborder de manière coordonnée le stockage tant *en phase d'exploitation qu'après la fermeture où la sûreté doit être assurée sans besoin d'intervention particulière (passivité)*, conformément à la Règle fondamentale de sûreté,
- la prise en compte d'échelles de temps extrêmement longues,
- le lien très étroit entre conception, acquisition de connaissances et évaluation de sûreté, dans un objectif d'évaluation de faisabilité,
- la place centrale accordée à la notion de maîtrise des incertitudes, en particulier pour la phase postérieure à la fermeture.

Ces particularités résultent tant de la spécificité de l'objet étudié (le stockage géologique) que de la question posée (celle de la faisabilité). Elles requièrent de mobiliser des disciplines nombreuses (ingénierie minière et nucléaire, sûreté, sciences de la terre, des matériaux...) et de mettre en œuvre des méthodes spécifiques, à l'interface entre ces disciplines.

Des solutions ouvertes et non optimisées au stade de l'évaluation de faisabilité

Si le Dossier 2005 Argile s'appuie sur les observations et résultats d'expérimentations réalisées sur le site de Bure (Laboratoire de Meuse/Haute-Marne), l'approche de sûreté ne constitue pas une démarche de sûreté « classique » et institutionnelle de demande de création, d'autorisation de mise en exploitation ou en service définitif d'installation nucléaire de base, au moins sous trois aspects :

- le but de la faisabilité est de montrer l'existence de solutions techniques, non de les figer définitivement.
 Les concepts pourront évoluer au fil des étapes qui pourraient conduire à l'ouverture d'un stockage.
 Ainsi, quand plusieurs solutions technologiques peuvent répondre à un problème, notamment d'exploitation, l'évaluation de faisabilité se fonde sur une des technologies les mieux maîtrisées, mais la possibilité de recourir à une autre demeure,
- les solutions technologiques proposées ne prétendent pas être optimisées, en particulier au plan de la sûreté d'exploitation. Il serait prématuré, dans le cadre d'une faisabilité, de mettre en œuvre dans toute sa complétude une démarche d'optimisation de la radioprotection de type ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*, aussi bas que raisonnablement possible), conduisant à optimiser la conception du stockage au regard de critères de sûreté d'exploitation (impact radiologique sur les travailleurs, sur le public, etc.).
 Il n'en demeure pas moins que le concepteur doit apporter les éléments montrant que les modèles proposés répondent aux objectifs de sûreté d'exploitation,
- le but de la démarche n'est pas de positionner le stockage sur un site particulier pour solliciter l'autorisation de construction, mais d'évaluer sa faisabilité dans une formation géologique particulière, en s'appuyant sur une localisation déterminée et en s'assurant de la transposabilité des résultats à une zone plus large. Cette transposabilité est le gage que les résultats obtenus ne dépendent pas des spécificités d'une zone de faible dimension, ce qui ne laisserait aucune souplesse pour une éventuelle implantation du stockage.

1.1 Principes généraux de la démarche de sûreté

1.1.1 Robustesse et démontrabilité

L'évaluation de sûreté s'appuie sur des concepts de stockage décrits jusqu'au niveau de détail adapté aux besoins de l'évaluation. *Ces concepts doivent permettre d'exploiter le stockage puis d'en maîtriser l'évolution à long terme, en toute sûreté pour le public et les travailleurs.* Ils sont définis au regard de deux principes :

- la robustesse : les éléments constituant le stockage doivent garantir un maintien de leur(s) fonction(s) face aux sollicitations raisonnablement envisageables et en dépit des incertitudes résiduelles. De manière générale, les concepts retiennent les solutions les plus robustes possible face aux perturbations externes et aux incertitudes. L'analyse de sûreté permet de porter un regard d'ensemble sur la robustesse des concepts proposés,
- la démontrabilité : le caractère sûr des concepts retenus doit pouvoir être vérifié aisément par les études sans faire appel à des démonstrations complexes, sujettes à caution. La démontrabilité est une notion relative et la simplicité d'une vérification n'est pas un but en soi : *le dossier doit faire le meilleur usage de lignes d'argumentation multiples* (évaluation de la sûreté par le calcul, par le biais de raisonnements qualitatifs, par l'appel à des analogues naturels, à des expérimentations ou à des démonstrateurs technologiques).

1.1.2 Sûreté en exploitation et sûreté à long terme : des approches spécifiques

Conformément à la RFS, deux principes orientent la conception du stockage :

- la protection des personnes et de l'environnement contre les atteintes éventuelles liées aux déchets radioactifs,
- la limitation à un niveau aussi faible que raisonnablement possible (principe d'optimisation de radioprotection ALARA) de l'impact radiologique éventuel.

Le Dossier 2005 se concentre sur le risque radiologique sans négliger pour autant les autres impacts potentiels d'un stockage. Les solutions aux problèmes posés par les radionucléides couvrent en effet une grande partie des difficultés dues aux toxiques chimiques, les problématiques étant de même nature (empêcher et retarder le transfert d'éléments toxiques jusqu'à l'environnement). Au stade de la faisabilité, l'impact chimique du stockage est étudié de manière générale et se concentre, pour les évaluations quantitatives, sur les quelques toxiques les plus pénalisants. De même, les impacts environnementaux (paysage, bruit, etc.) comparables à ceux d'autres industries ne constituent pas un sujet d'étude au niveau d'une phase de faisabilité. D'autres atteintes éventuelles à l'environnement, en particulier la dégradation de ressources naturelles (accès à un gisement de minerai sous-jacent au stockage, échauffement d'une nappe phréatique), sont prises en compte conformément à la RFS qui impose d'écarter tout site recelant une ressource exceptionnelle.

L'Andra a développé deux approches de sûreté différentes selon les phases de la vie du stockage :

- l'une destinée à la sûreté d'exploitation qui s'apparente à une démarche classique. Elle se concentre sur les problématiques spécifiques au stockage et ne traite pas de manière exhaustive des dispositions de sûreté déjà bien connues dans un autre contexte, par exemple pour les installations de surface. Les situations dange-reuses et les risques potentiels liés au contexte particulier du stockage ont été identifiés, puis des mesures de protection et de prévention ont été proposées pour les maîtriser et satisfaire aux objectifs de protection vis-à-vis du risque radiologique et des autres risques (incendie, écrasement...). L'analyse de la sûreté en exploitation a pris en compte les principaux risques spécifiques (exposition du personnel aux rayonnements, contamination lors d'une chute de colis, accident corporel de circulation, incendie...). Le risque résiduel qui persisterait malgré la mise en œuvre des mesures de prévention et de protection a aussi été caractérisé,
- l'autre, destinée à l'évaluation de la sûreté à long terme en phase de post-fermeture afin d'estimer la robustesse du stockage vis-à-vis de l'objectif d'isolement à long terme des déchets radioactifs par rapport à la biosphère. L'accent est porté sur l'intégration des connaissances scientifiques et la maîtrise des incertitudes.

1.2 La sûreté à long terme

1.2.1 Les étapes de l'évaluation de sûreté

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

La protection des personnes et de l'environnement vis-à-vis de la dissémination de radionucléides est la fonction fondamentale du stockage, sans être exclusive d'autres fonctions, par exemple l'accueil des colis.

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

Dans une démarche itérative entre conception et sûreté, l'Andra a alloué des fonctions de sûreté à tous les composants du stockage ayant un rôle significatif (formation d'accueil du stockage, colis de déchets, éléments d'architectures) et décliné cette analyse fonctionnelle en spécification technique de besoin pour chaque composant à concevoir et dimensionner. Les caractéristiques de ces composants (par exemple matériaux et épaisseur des colis de stockage, dimensions des alvéoles...) ont été déterminées au regard de la sûreté en prenant en compte les interactions avec l'environnement et les possibles incertitudes. Elles ont ensuite été intégrées dans les scénarios d'évolution du stockage et évaluées avec des valeurs de calcul plus ou moins pénalisantes.

La conception d'un système « multifonctions » complète ainsi la notion de système «multibarrières». Certains composants contribuent à remplir une même fonction (complémentarité) ou à maintenir la fonction en cas de défaillance de l'un d'eux (redondance).

Fonctions et barrières

On attend du stockage :

- qu'il empêche les circulations d'eau : le milieu géologique y contribue ainsi que la conception des ouvrages de stockage,
- qu'il immobilise les radionucléides au niveau des colis : les déchets eux-mêmes y contribuent, ainsi que les conteneurs et les conditions chimiques dans les alvéoles de stockage,
- et qu'il retarde et atténue la migration des radionucléides qui auraient été relâchés hors des alvéoles de stockage.

Ces fonctions sont assurées au fil du temps par plusieurs composants différents, indépendants (jusque dans une certaine limite) les uns des autres.

1.2.1.2 Synthèse des connaissances, maîtrise des incertitudes

L'évaluation de la faisabilité d'un stockage suppose d'acquérir une maîtrise suffisante du comportement des constituants du stockage, en particulier grâce à la constitution d'un corpus de connaissances scientifiques important et au développement d'une architecture de stockage jusqu'à un niveau de détail suffisant, en tenant compte des incertitudes, inévitables quand on considère une évolution sur des centaines de milliers d'années. Sur de telles échelles de temps, aucun retour d'expérience n'est disponible autrement que par des analogues naturels ou archéologiques. Ceci ne signifie pas pour autant que ces incertitudes résiduelles liées à la longue durée, et qui constituent une spécificité du dossier, ne peuvent être maîtrisées avec un degré de confiance suffisant :

- les dispositions sont prises pour se placer dans les conditions qui permettent de s'affranchir au maximum des incertitudes : choix d'un milieu géologique stable très peu affecté depuis son dépôt (il y a 155 millions d'années), fractionnement du stockage en zones pour éviter les interactions entre déchets de natures différentes, recours à des matériaux simples dont on connaît bien le comportement (par exemple l'acier non allié, le béton), etc.,
- en outre, la sûreté est intégrée en amont de la conception pour orienter les choix vers les solutions les plus robustes vis-à-vis d'éventuels manques de connaissances,
- enfin, les incertitudes sont abordées de manière systématique et leurs effets potentiels sont examinés, en particulier dans les analyses qualitatives de sûreté, et pris en compte dans les évaluations de sûreté.

L'architecture de stockage proposée par le Dossier 2005 :

- résulte ainsi d'un travail interactif entre les ingénieurs chargés de l'ingénierie et des programmes de recherche, et ceux en charge des évaluations de sûreté qui guident très à l'amont les programmes de recherche et les travaux de conception,
- intègre les connaissances acquises sur le site et les enseignements de l'évaluation de sûreté menée en 2001 pour le stockage en milieu argileux.

Dossier 2001 Argile : quelques enseignements



Les évaluations de sûreté menées en 2001 par l'Andra ont identifié les éléments du stockage et les phénomènes naturels sur lesquels porter les efforts : par exemple, caractérisation renforcée du milieu géologique, étude des scellements des ouvrages d'accès au stockage...

Le Dossier 2001 a aussi fait l'objet d'examens détaillés par les évaluateurs de l'Andra (Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection, Commission nationale d'évaluation) et d'une revue par les pairs menée sous l'égide de l'OCDE/AEN, qui ont conforté ou précisé les orientations pour la suite des recherches. Le retour d'expérience a conduit l'Andra à renforcer les interfaces entre d'une part l'ingénierie et la sûreté, d'autre part la recherche et la sûreté.

L'Andra a mis en œuvre trois approches complémentaires pour synthétiser les connaissances, décrire l'évolution du stockage et gérer les incertitudes :

- des référentiels de connaissances ont été constitués pour disposer d'une vue complète des éléments disponibles sur les composants étudiés : milieu géologique, matériaux, colis... Ils dressent l'état de la connaissance, identifient, de manière corrélative, les lacunes de cette dernière et contribuent ainsi à cerner les sources d'incertitudes et à orienter les actions pour les réduire,
- une fois atteint un bon niveau de connaissances de chacun des constituants et définie l'architecture globale du stockage, *il faut décrire le plus finement possible son évolution dans le temps et dans l'espace : c'est l'objet de l'analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS)* qui décrit les phénomènes (thermiques, mécaniques, hydrauliques, chimiques, radiologiques) et leurs couplages tout au long de l'évolution du stockage et précise les étapes de cette évolution, de la construction jusqu'à un million d'années. L'analyse du système impose de le décomposer en sous-systèmes simples : l'APSS découpe l'évolution du stockage en un ensemble de situations correspondant chacune à une partie du stockage et à une période temporelle définies, ainsi qu'à un état phénoménologique homogène. L'état des lieux des phénomènes et de leurs couplages, ainsi que des modèles associés, est établi pour chaque situation : il met en évidence les limites de la connaissance ou de la compréhension et cerne les incertitudes. *Le travail systématique accompli dans le cadre de l'APSS a ainsi conduit à recenser une série d'incertitudes*. Cette approche est complétée par une vue plus transverse des grands processus régissant l'évolution du stockage,
- enfin, de manière classique, les paramètres de calcul, modèles ou données sont systématiquement répertoriés afin d'assurer leur traçabilité et de les actualiser, au fur et à mesure des acquisitions de connaissances, pour les calculs de sûreté.

Incertitudes et échelles de temps

Les incertitudes ne sont pas de même nature selon les périodes, ni les composants ou parties du stockage et de son environnement. Par exemple :

- les incertitudes sur le comportement des matériaux et des colis (métaux, ciments, verres...) et leur dégradation augmentent dans le temps jusqu'à un stade où leur comportement n'est plus prévisible et où les matériaux cessent de pouvoir jouer un rôle favorable à la sûreté. Pour autant, si les conditions d'environnement sont maîtrisées, les propriétés favorables de ces matériaux peuvent être mobilisées sur des périodes très longues,
- l'incertitude sur le milieu géologique et son comportement va plutôt décroissant quand les processus thermiques, mécaniques et hydrologiques dus à la perturbation du stockage s'amenuisent ou atteignent un équilibre. Le délai d'atteinte de l'équilibre et sa nature peuvent en revanche être l'objet d'incertitudes,
- l'incertitude *sur l'environnement de surface* va croissant, en raison notamment des évolutions climatiques majeures, comme les glaciations périodiques.

Les différentes échelles de temps en cause sont intégrées dans l'analyse de sûreté dans l'attribution des fonctions de sûreté, l'évaluation des performances et l'analyse des incertitudes.

1.2.1.3 Un scénario d'évolution normale : vérifier le respect des objectifs

La confrontation de l'analyse fonctionnelle et de l'analyse phénoménologique des situations de stockage permet de décrire les situations normales d'évolution du stockage en situation de post-fermeture, c'est-à-dire celles dans lesquelles les composants répondent aux fonctions attendues et qui apparaissent les plus probables. S'il n'existe pas une évolution unique du stockage, dans la mesure où des incertitudes subsistent (par exemple la durée de vie d'un conteneur peut varier au-delà de la limite minimale fixée par le dimensionnement), les situations se ressemblent dans leur déroulement général et permettent de définir un Scénario d'évolution normale (SEN) assorti de situations ou modèles alternatifs et d'analyses de sensibilité. Une fois l'évolution normale décrite, les scientifiques proposent, selon un cadrage fixé par la sûreté, les modèles et jeux de paramètres qui la représentent le mieux.

Les calculs vérifient que les concepts proposés réalisent effectivement les fonctions de sûreté qui leur sont imparties et que les expositions radiologiques individuelles sont acceptables en évolution normale.

La mesure de l'impact radiologique et chimique est effectuée classiquement, en accord avec la RFS, par le calcul de la dose d'exposition individuelle engagée.

• *Pour les situations d'exploitation du stockage,* l'Andra s'est fixé les mêmes objectifs que pour ses installations actuelles en service :

- pour le public, une dose maximale admissible de 0,25 millisievert par an (mSv/an) en situation normale, en cohérence avec l'objectif imposé par la RFS pour le long terme. Cette valeur correspond à une fraction de la limite d'exposition individuelle du public (1 mSv/an) retenue par la Commission internationale de protection radiologique et la directive Euratom 96/29, hors exposition individuelle à la radioactivité naturelle (2,4 mSv/an en moyenne en France) et à des fins médicales,
- pour les travailleurs « exposés » (travaillant dans les zones nucléaires du stockage et faisant l'objet d'un suivi médical), une dose maximale admissible de 5 mSv/an en situation normale, soit le quart de la valeur réglementaire actuelle.

• Pour le long terme, le principal indicateur de sûreté demeure la dose engagée à l'exutoire, dans le cadre d'un groupe de référence et d'une biosphère. Elle doit, conformément à la RFS, rester inférieure à 0,25 mSv/an en situation normale.

Si le calcul de cette dose pour les périodes proches de la nôtre est un exercice bien connu dans le domaine des études d'impact, ce type d'évaluation présente des difficultés spécifiques quand elle est pratiquée sur un million d'années. A cette échelle, il est illusoire de prétendre disposer d'une évaluation précise des modes de vie des populations du secteur étudié. Les conditions d'environnement, en particulier climatiques, seront elles aussi soumises à des variations importantes dont on peut prédire les caractéristiques principales, mais dont il est difficile de rendre compte de manière précise dans un contexte local. Aussi, le modèle servant au calcul d'impact ne prétend pas avoir un caractère prédictif vis-à-vis des temps et voies de transfert des radionucléides jusqu'à la biosphère. Il entend seulement, dans une vision prudente, surestimer l'impact du stockage sans être grossièrement majorant. La dose calculée à long terme est un indicateur et non une prédiction de cet impact.

D'autres indicateurs sont proposés par les études de l'Andra pour caractériser le niveau de sûreté des concepts : en particulier, les flux de concentration de radionucléides évalués à certains emplacements (notamment à la sortie de la formation-hôte) permettent de préciser le jugement porté sur la sûreté du stockage et de s'affranchir d'une partie des incertitudes. Ils ne peuvent cependant pas être comparés à des seuils réglementaires.

Le calcul de l'impact des toxiques chimiques

La méthodologie retenue consiste à calculer les concentrations de toxiques à l'exutoire et/ou les doses susceptibles d'être ingérées par le groupe de référence, et à les comparer selon ce qui paraît le plus pertinent :

- en priorité aux valeurs toxicologiques de référence, selon la méthodologie recommandée pour les études d'impact des installations classées, quand ces valeurs sont disponibles,
- sinon aux concentrations maximales dans l'environnement fixées par la réglementation sur la qualité des eaux, ou à des valeurs de référence retenues au plan international, comme celles de l'Organisation mondiale de la santé pour certains toxiques.

1.2.1.4 Gérer les incertitudes : une analyse qualitative de sûreté et des scénarios d'évolution altérée

Une analyse qualitative de sûreté recense et évalue, composant par composant et au regard des fonctions de sûreté imparties à chacun, les incertitudes pour s'assurer que :

- ces incertitudes sont couvertes par des choix de conception qui en réduisent les effets (par exemple, recours à des surconteneurs pour se prémunir contre les incertitudes sur la migration des radionucléides en environnement chaud),
- elles sont prises en compte dans le scénario d'évolution normale envisagé, notamment au travers d'analyses de sensibilité.

Cette analyse peut mettre en évidence des incertitudes résiduelles non encore prises en compte. Il faut alors s'assurer qu'elles ont des effets minimes ou qu'elles correspondent à la manifestation d'événements peu probables. Les résultats de l'analyse qualitative débouchent sur la définition de scénarios d'évolution altérée. Pour s'assurer de leur complétude, ils sont confrontés aux bases de données des experts internationaux décrivant les processus à prendre en compte, en particulier les FEPs (« features, events and processes ») de l'OCDE/AEN.

L'Andra a défini et étudié ces scénarios correspondant à des événements peu probables ou à des dysfonctionnements de fonctions de sûreté :

- scénario altéré « défaut de colis » où une série de colis n'assurerait pas les fonctions attendues, avec plusieurs variantes en termes de types de conteneurs ou de nombre de colis incriminés,
- scénario où tout ou partie du dispositif de scellements est défaillant,
- scénario où une intrusion humaine involontaire perturbe le stockage : compte tenu de la profondeur de celui-ci, elle prend la forme d'un forage (interceptant une galerie ou un module).

Ces scénarios font également l'objet d'une description phénoménologique (APSS en situations altérées) et d'une modélisation. En supposant le dysfonctionnement d'une barrière ou d'une fonction de sûreté, ils permettent d'apprécier, par différence avec le SEN, la robustesse d'ensemble du système.

Données internationales guidant l'analyse

Outre les recommandations de la RFS, l'Andra a pris en compte certains principes émis par les organismes (AIEA, OCDE/AEN, CIPR) qui permettent le dialogue avec la communauté internationale, en établissant des références communes. Trois exemples :

- l'AEN recommande de définir avec soin « the assessment basis » (c'est-à-dire les connaissances scientifiques et techniques soutenant l'évaluation de sûreté, les outils de modélisation, les bases de données) et d'en discuter la qualité et la crédibilité. L'assessment basis est constitué en premier chef par les trois tomes du Dossier 2005 (Architecture et gestion du stockage, Evolution phénoménologique du stockage, Evaluation de sûreté du stockage) qui exposent respectivement les concepts retenus et la motivation des choix, la base des connaissances acquises et les modèles conceptuels associés, la mise en perspective de ces éléments et leur discussion pour assurer la démonstration de sûreté,
- l'AEN recommande aussi le recours à de « multiple lines of evidence » c'est-à-dire, au-delà des seuls calculs de performance, à des arguments qualitatifs et à des indicateurs variés pour accroître la crédibilité et la solidité des analyses. Par l'importance accordée à l'exploitation la plus large des données scientifiques et à l'analyse qualitative de sûreté, le Dossier 2005 s'inscrit dans cette démarche,
- l'AEN attend d'un dossier de sûreté, *clarté, intelligibilité* (transparency), *traçabilité* (traceability) pour remonter à l'origine de toute affirmation, donnée, hypothèse, par une présentation claire, par l'utilisation de références, par l'exposé et la discussion des incertitudes, des questions ouvertes ou de tout élément susceptible de mettre en question la sûreté du stockage (*openness*) et par l'organisation de revues des pairs, internes et externes. Dans cette optique et pour préparer son dossier, l'Andra a notamment mis en place des groupes de relecture externes pour une large part des documents constituant le Dossier 2005.

1.2.2 Les fonctions de sûreté à long terme du stockage

Pour répondre à l'objectif d'un stockage géologique : protéger sur une très grande durée l'homme et l'environnement des risques associés aux déchets HAVL en confinant ces déchets dans une formation profonde afin de s'opposer à la dissémination des radionucléides qu'ils contiennent, on confère à l'installation des fonctions multiples de sûreté. En se complétant, elles renforcent les performances globales du système ; en offrant une certaine redondance, elles permettent de mieux résister à une défaillance ou à une agression externe.

Tout d'abord, le stockage en profondeur met les déchets à l'abri des phénomènes d'érosion et des principales activités humaines qui n'affectent, à l'échelle de centaines de milliers d'années, qu'une épaisseur superficielle de terrain (quelques dizaines de mètres).

Mice on co	nuico -	100	ans	1 000 a	ins 10.00	0 ans	100 000 ans	10 ⁶ ans	
 Limiter le débit d'eau souterraine Limiter la vitesse de circulation d'eau entre le stockage et les formations aquifères 									
 2- Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage Protéger les déchets B Interdire l'arrivée d'eau sur les déchets C Limiter le transport des espèces dissoutes au voisinage des déchets C Interdire l'arrivée d'eau sur les combustibles usés Limiter le transport des espèces dissoutes au voisinage des combustibles Pour tous les déchets et combustibles, limiter la dissolution des éléments radioactifs, assurer des conditions réductrices, filtrer les colloïdes 	·····								
 3- Retarder et atténuer la migration des éléments toxiques vers l'environnement Contrôler la migration par diffusion-rétention- dispersion dans la formation d'accueil Retarder la migration dans des composants ouvragés Préserver la capacité de dispersion naturelle dans les formations environnantes 									
 4- Préserver les propriétés favorables du milieu, limiter les perturbations Dissiper la chaleur Limiter les déformations mécaniques dans les argilites Protéger le stockage des perturbations chimiques induites par l'altération de certains colis Rester sous-critique 									

Fonctions de sûreté au cours du temps

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

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

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

Pour répondre à ces fonctions :

- on mobilise le plus largement les propriétés favorables des argilites du Callovo-Oxfordien (faible perméabilité, capacité de rétention, propriétés géochimiques, environnement hydrogéologique voir chapitre 3). L'âge de la formation, sa stabilité tectonique, la profondeur d'implantation du stockage permettent d'envisager une grande stabilité de ces propriétés favorables aux échelles de temps étudiées (du millier à plusieurs centaines de milliers d'années),
- on conçoit un stockage qui crée les conditions requises et préserve les propriétés favorables du milieu géologique, en particulier en limitant les perturbations dues au creusement des ouvrages souterrains, aux matériaux rapportés et à la présence des déchets (notamment leur dégagement thermique).

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

L'objectif est de confiner la radioactivité contenue dans les colis, c'est-à-dire d'abord de l'y maintenir immobilisée. Le rôle du stockage est de :

- *limiter le renouvellement d'eau autour des colis*, car c'est le principal facteur susceptible d'altérer l'enveloppe des colis,
- s'opposer à un entraînement convectif des radionucléides pour, au contraire, restreindre leur possibilité de migration à la seule diffusion, phénomène très lent, en limitant à la fois le débit d'eau atteignant le stockage et la vitesse de circulation de l'eau dans le stockage jusqu'aux formations qui l'entourent.

La faible perméabilité des argilites du Callovo-Oxfordien ainsi que des dispositions adéquates d'architecture et de scellement limitent les flux d'eau dans le stockage.

Régime hydraulique dans le stockage

A l'état naturel, la formation géologique d'accueil est saturée en eau ; *l'eau peut s'y déplacer verticalement, par drainance,* selon le sens du gradient imposé par la différence de charge hydraulique (pression) entre les formations géologiques sus- et sous-jacentes plus perméables que l'argilite du Callovo-Oxfordien, *mais à une vitesse très lente due à la très faible perméabilité de l'argilite* (de l'ordre de quelques centimètres par centaine de milliers d'années).

Ces conditions ne sont modifiées par le stockage que :

- durant sa phase d'exploitation, car la création et la ventilation des ouvrages provoquent une désaturation de l'argilite à leur voisinage,
- et durant une période transitoire, après la fermeture des installations souterraines, marquée par le retour progressif à saturation du milieu géologique et des matériaux du stockage, où les écoulements convergent globalement vers les ouvrages. La durée de cette période de resaturation, estimée à une centaine de milliers d'années, dépend de la perméabilité du milieu (très faible pour les argilites du Callovo-Oxfordien) et des ouvrages (conception, dimensions, matériaux...), de l'effet des gaz (hydrogène de corrosion notamment) qui retardent la fin de la resaturation, etc.

Une fois resaturés les installations souterraines et le milieu, les pressions hydrauliques se rééquilibrent et les écoulements dans les argilites du Callovo-Oxfordien s'organisent à nouveau en un régime unidirectionnel et vertical.

1.2.2.2 Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser à l'intérieur du stockage

L'arrivée d'eau sur les colis de déchets ne peut pas être exclue à terme. Dans ces conditions, le rôle du stockage est de limiter le relâchement des radionucléides dans l'eau, de les « immobiliser » dans les déchets ou au plus près. L'objectif est double :

- limiter l'altération des conteneurs de déchets par l'eau et, à l'intérieur de ces conteneurs, des matrices (verre, bitume, ciment) où sont incorporés les radionucléides, en créant des conditions d'environnement physiques et chimiques favorables,
- quand l'altération des colis de déchets par l'eau a démarré, limiter la mobilité des radionucléides susceptibles de se dissoudre dans l'eau en créant des conditions géochimiques favorables (conditions réductrices et contrôle du pH) à même de maintenir ou de précipiter ces éléments sous forme solide (seuls quelques radionucléides comme l'iode 129 et le chlore 36 sont insensibles à ces conditions géochimiques) et en mobilisant les propriétés favorables du milieu géologique (par exemple la faible porosité de la roche et la capacité de rétention des minéraux argileux qui assurent une fonction de filtration physique ralentissant encore la progression de ces éléments).

Limiter l'altération des colis par l'eau : différents cas de figure selon les déchets

- Pour les colis de déchets B, un objectif est de protéger de la corrosion les pièces métalliques qu'ils contiennent en créant un environnement chimique favorable (potentiel réducteur, pH 10 à 12,5) et, dans le cas particulier des déchets enrobés dans du bitume, de mobiliser durablement les propriétés de confinement du bitume en maintenant la température de l'alvéole entre 20 et 30°C et en contrôlant le pH de l'eau atteignant le bitume (pH 10 à 12,5).
- Pour les colis de déchets C vitrifiés, on vise à interdire l'arrivée d'eau au contact du verre pendant plusieurs milliers d'années. Cela permet de préserver la durabilité du verre, sur une période très supérieure à la phase thermique durant laquelle la température du verre reste élevée et les phénomènes de relâchement des radionucléides peu prédictibles dans ces conditions, en l'état actuel des connaissances. Au-delà de la phase thermique, on cherche à limiter l'altération du verre, d'une part en limitant les possibilités de transport des éléments dissous à son voisinage, d'autre part en contrôlant le pH à l'interface entre le verre et le milieu environnant (entre 7 et 9), le verre étant sensible à ce paramètre.
- Pour les combustibles usés, une des fonctions du stockage est aussi d'interdire l'arrivée d'eau sur les assemblages pendant une période d'environ 10 000 ans, là encore très supérieure à la phase thermique. Au-delà et pour limiter la dissolution du combustible, on cherche à contrôler le transport des éléments dissous au voisinage des assemblages ainsi que la chimie de l'eau (pH neutre à alcalin, conditions réductrices).

1.2.2.3 Retarder et atténuer la migration des radionucléides vers l'environnement

L'étude des formations encaissantes

Bien qu'elles ne relèvent pas du « système de confinement », les formations géologiques encaissantes (au-dessus et au-dessous de la formation d'accueil du stockage) sont étudiées.

Objectif : comprendre comment la radioactivité qui aurait pu être relâchée par le stockage hors de la formation d'accueil pourrait rejoindre la biosphère. Une des fonctions du stockage est de *retarder et atténuer, dans l'espace et le temps, la migration des radionucléides* relâchés par les déchets et dissous dans l'eau. On mobilise à cet effet les propriétés favorables de la formation-hôte : pour les argilites du Callovo-Oxfordien, une faible perméabilité, un faible coefficient de diffusion et une bonne capacité de rétention des radionucléides.

En complément, les radionucléides peuvent être retenus à l'intérieur de certains composants du stockage (alvéoles, barrières ouvragées et corps de scellement en bentonite...) et donc leur migration retardée.

1.2.2.4 Préserver les propriétés favorables du milieu, limiter les perturbations induites par le stockage

La conception et les méthodes de réalisation du stockage cherchent à mobiliser les propriétés favorables du milieu géologique et à limiter les perturbations provoquées par les installations.

Une première fonction recherchée est de dissiper la chaleur produite par la radioactivité des déchets. L'objectif est de maintenir la température au contact des colis inférieure à 100 °C et la température de la roche inférieure à 90 °C afin de rester dans des domaines de température couverts par l'état des connaissances et par la capacité à rendre compte des phénomènes et de leurs couplages. Cette fonction concerne particulièrement les déchets C vitrifiés et, le cas échéant, les combustibles usés.

En outre, pour ne pas provoquer de transformations minéralogiques irréversibles, il faut éviter de délivrer une trop grande quantité de chaleur à la roche. On fait donc en sorte que la durée pendant laquelle l'argilite au contact des alvéoles de déchets est portée à 70 °C n'excède pas mille ans.

Une deuxième fonction concerne la maîtrise des perturbations dans la formation d'accueil :

- l'ouverture de cavités souterraines, dans un milieu soumis à des contraintes mécaniques naturelles liées au poids des terrains, engendrera des déformations dans les argilites. De plus, la chaleur dégagée par les colis de déchets C et CU dilatera les matériaux et créera des déformations. En lien avec les fonctions de sûreté précédentes (opposition aux flux d'eau, retard et atténuation de la migration des radionucléides), il convient de limiter au maximum les dommages provoqués localement par ces déformations mécaniques sur la roche,
- il faut aussi vérifier que les perturbations hydriques (désaturation lors des travaux) et chimiques (dues à l'apport d'oxygène et aux matériaux rapportés) du milieu géologique, éventuellement couplées avec les perturbations mécaniques, n'engendrent pas de dommages préjudiciables dans le milieu,
- enfin, le contenu en matière fissile de certains colis conduit à s'assurer que le stockage reste dans une configuration sous-critique (c'est-à-dire qui empêche qu'une réaction nucléaire en chaîne incontrôlée ne s'amorce d'elle-même au sein des déchets), en tenant compte des déplacements potentiels de matière et de l'évolution des matériaux à long terme.

1.2.3 L'architecture du stockage : répondre aux exigences de sûreté à long terme

La maîtrise des circulations d'eau, du relâchement des radionucléides, de leur migration vers l'environnement et des perturbations induites par le stockage a conduit à proposer plusieurs dispositions d'architecture structurantes.

1.2.3.1 Un positionnement du stockage au milieu de la formation géologique

Pour maximiser, au-dessus et au-dessous du stockage, les épaisseurs de l'argilite de la formation-hôte, qui constitue la première barrière à la circulation d'eau et à la migration des radionucléides, l'Andra propose *des installations souterraines de hauteur limitée* (afin de préserver la garde la plus importante possible au-dessus et au-dessous des installations), *organisées sur un seul niveau au milieu de la couche du Callovo-Oxfordien* (afin d'assurer une égale protection des formations géologiques sus- et sous-jacentes). La hauteur de garde a été fixée à au moins 50 m : l'épaisseur minimale de la formation étant de 130 m, les installations souterraines se situent dans un niveau médian de 30 m d'épaisseur centré à mi-hauteur de la formation.

1.2.3.2 Un fractionnement du stockage

Les zones de stockage sont compartimentées pour réduire la quantité de déchets et de radionucléides qui serait affectée dans une situation de défaillance ou d'intrusion. *Chaque compartiment est séparé des autres par une forte épaisseur d'argilites* (largeur de garde de 250 m entre zones et 50 m entre modules) et par des scellements fermant les galeries d'accès.

La séparation des déchets B, C et des CU en zones distinctes, phénoménologiquement indépendantes, évite la complexité inhérente à des interactions entre déchets de types différents. Cela simplifie ainsi la compréhension des phénomènes et contribue, en particulier, à l'indépendance thermique des différentes zones du stockage.

1.2.3.3 Des ouvrages conçus pour limiter les perturbations mécaniques du milieu

Le profil des ouvrages est simple, en général proche d'un cercle, configuration la plus stable et la moins perturbatrice pour un ouvrage souterrain, et leur dimension est limitée autant que possible. Les ouvrages souterrains sont dotés d'un revêtement qui les soutient sur une durée au moins séculaire. Pour favoriser leur stabilité, la distance entre deux alvéoles de stockage adjacentes est d'au moins cinq fois leur diamètre.

Pour éviter une éventuelle propagation de dommages mécaniques dans les argilites après la dégradation des revêtements (voir chapitre 6), on limite, par conception, le taux de vide résiduel autour des colis dans les alvéoles et on remblaie certains ouvrages souterrains (galeries et puits) lorsque leur fermeture est décidée dans le cadre d'une gestion réversible du stockage.

1.2.3.4 Un dimensionnement limitant les perturbations thermiques

Le nombre de colis de stockage par alvéole de déchets C (ou de combustibles usés) et l'écartement des alvéoles entre elles sont déterminés pour limiter la température et empêcher une éventuelle altération de l'argile (température dans l'argilite inférieure à 90 °C, puis à 70 °C au-delà de 1 000 ans). La mise en stockage des colis les plus chauds peut nécessiter un entreposage préalable relativement long. Par ailleurs, pour préserver les capacités de confinement du bitume, qui nécessitent selon les modèles actuels une température inférieure à 30 °C, les colis B bitumés sont éloignés des autres déchets, plus chauds.

1.2.3.5 Un scellement multiple des installations souterraines et une architecture en cul-de-sac pour s'opposer aux circulations d'eau

Lorsque la fermeture du stockage est décidée et mise en œuvre progressivement, les alvéoles, galeries d'accès et puits sont scellés par des bouchons peu perméables à base d'argile gonflante.

Les scellements s'opposent aux circulations d'eau (facteur d'altération des colis et de relâchement des radionucléides qu'ils contiennent) et contribuent à contrôler la migration des radionucléides. Des dispositifs particuliers ont été étudiés et testés pour assurer la continuité de l'étanchéité entre les scellements des alvéoles et les argilites du Callovo-Oxfordien, et interrompre la zone d'argilite qui aurait été fracturée au voisinage immédiat de l'excavation.

De plus, pour réduire l'extension de la zone endommagée autour des scellements, les alvéoles et tronçons de galeries destinés à être scellés sont orientés parallèlement à la contrainte géomécanique principale majeure et leur section au droit du scellement est minimisée (inférieure à 7 m).

Pour limiter les circulations d'eau, les ouvrages sont disposés en cul-de-sac :

- les alvéoles de stockage sont des tunnels « borgnes »,
- les ensembles et sous-ensembles d'alvéoles ont une topologie en cul-de-sac. L'accès à un ensemble d'alvéoles se fait par un nombre limité de galeries parallèles et proches les unes des autres,
- le stockage est lui-même globalement en cul-de-sac : tous les puits sont regroupés dans une même zone, ce qui annule pratiquement les différences de charge hydraulique entre eux.

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

La conception des alvéoles de stockage, en particulier le choix des matériaux constitutifs, offre aux déchets et colis un environnement physico-chimique favorable. L'objectif est de retarder leur altération dans le temps pour limiter un relâchement précoce de radionucléides.

Le béton envisagé pour les alvéoles de déchets B est un matériau favorable à la protection physico-chimique des déchets et à la rétention de certains radionucléides ; la perturbation chimique induite sur le milieu reste limitée.

Au contraire, pour les déchets C vitrifiés, l'usage de béton n'est pas envisagé au voisinage des colis car les conditions alcalines qu'il créerait pourraient accélérer l'altération du verre. Seuls des matériaux métalliques ont été retenus.

Colis de stockage : acier ou béton

Le béton est bien adapté au conteneur du colis de stockage des déchets B : il se prête à une mise en œuvre en grandes quantités, sa densité modérée limite la masse des colis à manutentionner et il peut être particulièrement durable dans les alvéoles de stockage ventilées pendant leur exploitation.

Un conteneur métallique apparaît, en revanche, plus pertinent pour le conteneur de stockage des colis de déchets C et des CU. L'acier résiste mieux à la température et peut ainsi, en l'absence d'oxygène, assurer avec fiabilité une étanchéité totale à l'eau sur de longues durées. Un béton serait moins favorable à long terme vis-à-vis de la capacité du verre ou des pastilles de combustible usé à retenir durablement les radionucléides à vie longue et créerait des conditions alcalines préjudiciables aux verres.

					Principaux composants manufacturés										
Fonctions Protéger les personnes et l'environnement de la dissémination de substances radioactives • en tenant compte d'événements naturels probables et de situations hypothétiques, • en protégeant l'environnement d'autres impacts (chimique)			Période	Colis de stockage	Modules de stockage	Puits et galeries de liaison	Scellements d'alvéoles	Scellements de puits et galeries de liaisons	Remblais	Installations de surface	Moyens de construction, exploitation, gestion	Milieu géologique	Colis primaires		
lsoler les déchets des phénomènes d'érosion en surface et des activités humaines banales				Après fermeture											
S'opposer à la circulation d'eau Limiter les flux d'eau et la vitesse de circulation									X						
Limiter le relâchement des éléments toxiques et les immobiliser dans le stockage															
Déchets B	Protéger les déchets mé	étallique	s de la corrosion	Après fermeture											
	Decilets D	Protéger le bitume d'en température, déformatio	robage ons, pH	(déchets bitumés) :	Toutes										
Déchets C vitrifiés	Déchets C	Interdire l'arrivée d'eau s la période thermique	sur le ve	erre pendant	Période thermique	X									
	vitrifiés	Limiter l'altération aque des espèces dissoutes a	use du v au voisir	verre, le transport nage, le pH	Après fermeture										
Combustibles usés	Combustibles	Interdire l'arrivée d'eau :	sur les a	assemblages	Période thermique	Х									
	Limiter l'altération aqueu le transport des espèces	use de la s dissou	a céramique, tes au voisinage												
Limiter la dissolution des éléments toxiques, assurer des conditions chimiques réductrices			Après fermeture												
Filtrer les colloïdes															
Re vei	tarder et atténuer la rs l'environnement	a migration des élément	s toxiqı	Jes		_									
Contrôler la migration par diffusion, rétention, dispersion dans la formation d'accueil			Après fermeture												
Retarder la migration des éléments toxiques dans les composants ouvragés			Toutes												
Préserver la capacité de dispersion naturelle dans les formations géologiques environnantes			Après fermeture												
Pré	éserver les propriét	és favorables du milieu													
Limiter les déformations mécaniques dans les argilites du Callovo Oxfordien								X							
Dissiper la chaleur (déchets C vitrifiés et combustibles usés essentiellement)															
Protéger les modules de stockage des perturbations chimiques induites par l'altération de certains colis			Toutes												
Rester sous-critique (combustibles usés, déchets C vitrifiés type C4, déchets B - types B3/4/5)															
Fractionner le stockage															
	Contribution d'un composant Caractéristique du milieu géologique														



Fonction principale d'un composant



Caractéristique du milieu géologique intervenant dans la réalisation d'une fonction

Fonction mobilisant une propriété favorable du milieu géologique

Caractéristique de colis primaires intervenant dans la réalisation d'une fonction



1.3 La sécurité et la sûreté opérationnelle

Comme dans toute installation industrielle, la construction et l'exploitation du stockage induisent des risques pour les personnes et l'environnement : risques radiologiques, mais aussi risques conventionnels communs à de nombreuses activités industrielles non nucléaires (incendie, déflagration, rejets de gaz, risques électriques, émission de poussières, chute de blocs...). La sûreté opérationnelle couvre la maîtrise de ces risques qui sont pris en compte dans la conception des installations. Elle vise à confiner les matières radioactives pour en prévenir la dissémination, protéger les opérateurs et le public contre l'irradiation, éviter un accident de criticité, évacuer les gaz produits par les colis pour limiter la formation d'atmosphères explosives, évacuer la chaleur dégagée par certains colis, prévenir les risques accidentels conventionnels.

En s'appuyant sur les expériences industrielles d'exploitation d'installations nucléaires, l'Andra a identifié et hiérarchisé les situations potentiellement dangereuses durant l'exploitation du stockage (analyse de risque) : la vraisemblance de leur apparition et la gravité de leurs conséquences ont été appréciées de manière qualitative et des mesures de prévention et de protection proposées. *Certains risques particuliers à une installation de stockage, liés à une situation accidentelle (incendie, chute de colis, chute de cage en puits), ont fait l'objet d'études détaillées (voir chapitre 5).*

L'analyse du risque

Elle vise à identifier les risques induits par les activités du stockage, de la construction à la fermeture des installations, à les caractériser et à proposer des mesures de réduction.

Elle commence par l'identification des risques potentiels à partir de listes types de dangers et du retour d'expérience d'installations comparables. L'analyse se fonde sur le découpage des installations et les fonctions à assurer pendant un temps donné.

Une fois identifié, chaque risque est caractérisé et on propose des mesures de prévention (empêcher que le danger ne se matérialise) et de protection (en limiter les conséquences s'il se produit). Par exemple : écrans et protections biologiques pour se prémunir de l'irradiation, ventilation pour diluer les gaz et la chaleur, calculs pénalisants conduits sur toutes les situations de la vie des colis de stockage par rapport au risque de criticité, etc.

Pour compléter l'analyse, on *apprécie au final le risque résiduel* qui demeure malgré les mesures de réduction, c'est-à-dire sa vraisemblance d'apparition et ses conséquences potentielles sur l'homme et l'environnement.

1.3.1 Les risques conventionnels

La construction du stockage

Elle engendre des risques comparables à ceux rencontrés pour la construction d'ateliers industriels, d'installations minières, de tunnels souterrains : pour l'essentiel, chutes de charges lors de manutentions ou de blocs dans les travaux souterrains, accidents dus à la circulation, à l'utilisation d'électricité... S'y ajoutent les risques inhérents à l'ambiance de travail : exiguïté, bruit, poussières, fumées d'engins...

La prévention de ces risques peut être assurée par la mise en place de protections physiques et de consignes, la mise à disposition de moyens d'intervention, la formation et la sensibilisation des équipes.

Durant l'exploitation du site de stockage

Une partie de ces risques conventionnels subsiste après l'achèvement des travaux de construction, mais à un moindre degré. Dans les installations de surface et souterraines, le travail doit être organisé selon les contrôles, procédures et autorisations requis dans une installation nucléaire de base.

L'Andra a porté une attention particulière au risque d'incendie, pour lequel le contexte souterrain peut être un facteur aggravant. La prévention passe par le contrôle et la limitation des produits inflammables, le recours à des engins électriques, la mise en place de procédures de maintenance et de contrôle ainsi que par la formation du personnel. En outre, des systèmes de détection, d'extinction et d'évacuation des fumées doivent être installés et des circuits d'évacuation organisés.

1.3.2 Des risques radiologiques et des dispositions de protection similaires à ceux de l'industrie nucléaire

Les colis de déchets contiennent des matières radioactives qui présentent pour les personnes des risques d'exposition externe (irradiation) et interne (inhalation, ingestion). La maîtrise du risque radiologique s'appuie sur des dispositions courantes dans l'industrie nucléaire afin de limiter l'exposition des personnes à l'objectif fixé par l'Andra :



Contrôle de non-contamination par frottis

- par rapport au risque d'exposition externe (irradiation) : conditionnement des colis en cellules blindées inaccessibles aux opérateurs intervenant à distance derrière des écrans de protection, transport des colis de stockage dans des hottes de protection biologique, zonage des locaux selon leurs niveaux d'irradiation pour limiter la présence de personnel à proximité des colis, déport des postes de commande des engins pour les éloigner de la source radioactive...
- par rapport au risque d'irradiation interne (par ingestion de particules radioactives présentes à la surface des emballages de transport, des colis ou des hottes de transfert) : contrôles de non contamination surfacique des emballages des colis (qui doit, selon la réglementation actuelle des transports, être inférieure à 4 becquerels/cm² pour les émetteurs β , γ et 0,4 becquerels/cm² pour les émetteurs α), des colis primaires, des colis de stockage, des hottes de transfert, mise en dépression des cellules blindées et possibilité de systèmes de filtration...

Le risque radiologique lié à la présence naturelle de gaz radon en milieu souterrain est faible en milieu argileux et il est très minimisé par la ventilation permanente des galeries.

Des écrans suffisamment épais

L'exposition externe est maîtrisée par l'épaisseur des écrans de protection radiologique entre les sources radioactives et les personnes :

- pour les installations fixes (portes, murs, portes et operculaires des alvéoles de stockage...), cette épaisseur est calculée pour qu'en conditions normales d'exploitation, les opérateurs séjournant de façon permanente à proximité des locaux contenant des sources radioactives ne soient pas exposés à un débit de dose supérieur à 5 mSv/an,
- pour les sources mobiles, notamment les hottes de transfert des colis, les débits de dose maximum permettent aussi de respecter la valeur de 5 mSv/an, aucun poste de travail permanent n'étant prévu à proximité immédiate durant leur transfert.

1.3.3 Le risque de criticité

Le risque de criticité est lié à une réaction nucléaire en chaîne non contrôlée. Seuls sont concernés en pratique les colis de combustibles usés, car les colis B et C ne contiennent pas la quantité suffisante (« masse critique ») de matières fissiles nécessaire à la réaction.

Pour s'affranchir de ce risque, on vérifie que l'agencement des assemblages dans les colis maintient une géométrie sous-critique et l'on recourt à des procédés de traitement à sec, c'est-à-dire sans apport d'eau qui favoriserait une réaction de fission.

Dans le cadre de l'exploitation d'installations de stockage, les événements susceptibles d'induire un risque de criticité correspondent à la conjonction d'un fort endommagement accidentel des colis de CU suite à leur chute et d'une arrivée d'eau. *La limitation des hauteurs de manutention et le dimensionnement des emballages et de la hotte de transfert* (conçus pour résister à des hauteurs supérieures à la hauteur de chute possible) réduisent le risque et les conséquences d'une chute accidentelle, de même que l'absence d'empilement des colis. Le cas particulier de la chute d'un colis en puits a été étudié de manière spécifique (voir chapitre 5).

1

1.3.4 Les risques liés à l'environnement externe du stockage

1.3.4.1 Le séisme

La sismicité des sites étudiés est un paramètre important. On recherche des zones présentant une faible sismicité. Dans le cas du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, la probabilité qu'un séisme se produise sur le secteur est très faible. De plus, les ouvrages souterrains résistent, en règle générale, assez bien aux sollicitations sismiques, en particulier du fait de l'atténuation des mouvements liée à la profondeur. Pour prévenir la perte des fonctions de sûreté (protection radiologique, non dispersion de matières radioactives), *les équipements et bâtiments qui renferment des déchets radioactifs sont dimensionnés au Séisme Majoré de Sécurité* (SMS, défini dans la RFS n° 2001-01). *Pour les installations du fond, les études ont vérifié que le SMPP, Séisme Maximum Physique Possible, qui est plus pénalisant que le SMS, n'a pas d'effet sur les ouvrages.*

1.3.4.2 Les risques météorologiques

Les principaux risques (précipitations exceptionnelles, températures extrêmes, foudre, vent très violent...) sont classiquement pris en compte dans le dimensionnement des installations de surface et n'ont pas d'impact sur les activités souterraines.

1.3.4.3 La chute d'avion

Une chute d'avion n'impacterait que les installations de surface. Une règle fondamentale de l'Autorité de sûreté énonce des recommandations pour évaluer ce risque et le prendre en compte, si nécessaire, dans le dimensionnement des installations. L'objectif est, là encore, de se prémunir contre une perte de confinement des matières radioactives abritées dans les installations. Une telle étude relèverait d'un stade plus avancé du projet et serait conduite le moment venu.

1.3.4.4 La perte de l'énergie et des utilités

Cet événement ne mettrait pas en danger immédiat le personnel mais entraînerait des difficultés dues à l'arrêt de divers systèmes (ventilation, transfert dans les puits, éclairage...). Plusieurs solutions peuvent être étudiées : redondance des sources, alimentation de secours, batteries...

2. La réversibilité

2.1 L'exigence de réversibilité

L'étude de la réversibilité du stockage est prévue par la loi de 1991. En juin 1998, la Commission nationale d'évaluation (CNE) remettait au Gouvernement un rapport sur la réversibilité. En décembre 1998, le Gouvernement rendait publique une déclaration rappelant que les recherches devaient s'inscrire dans une logique de réversibilité. Les travaux de l'Andra intègrent cette exigence à la conception du stockage. Une telle exigence implique au fil du temps une présence humaine, une surveillance et des actions de maintenance, et ne s'oppose en rien à la sûreté à long terme, objectif primordial du stockage. Au contraire, par une gestion prudente et progressive du processus de stockage, la réversibilité peut contribuer à améliorer la confiance en la sûreté à long terme.

2.1.1 Les motivations

La notion de réversibilité est étroitement liée à la mise en œuvre du principe de précaution. La préservation de la réversibilité correspond à une conduite « prudente » de la gestion à long terme des déchets radioactifs : elle conduit à préférer des décisions laissant les choix ouverts, une gestion progressive du stockage, des solutions flexibles et des choix réversibles plutôt qu'une approche technique figée.

Elle renvoie aussi aux droits des générations futures et au respect de leur liberté de choix : les générations futures pourraient faire valoir d'autres choix de gestion des déchets, par exemple reprendre des matières radioactives présentes dans le stockage pour de nouveaux traitements. La réversibilité laisse ouvertes des possibilités de choix et permet aux générations futures de conserver la maîtrise des processus environnementaux ou technologiques, sans toutefois leur abandonner des questions sans esquisse de solution ou d'outils pour les traiter. Le respect de ces choix éventuels induit une souplesse de conception du stockage, avec des options progressives et évolutives.

Elle se réfère également à une attitude de modestie et d'humilité : compte tenu des très longues échelles de temps considérées pour l'étude du stockage, elle conduit à privilégier une approche prudente au regard des connaissances scientifiques disponibles à un moment donné et des aléas possibles.

Dans cette optique, la réversibilité ne peut pas être comprise comme une notion de « tout ou rien » qui supposerait une première phase où le stockage serait « totalement » réversible, puis une seconde phase où il serait « totalement » irréversible. Au contraire, l'Andra a examiné une évolution progressive du degré de réversibilité au cours du processus de stockage, appréhendant ainsi la réversibilité en terme de niveaux.

2.1.2 L'approche retenue par l'Andra

2.1.2.1 Des niveaux et des étapes de réversibilité

Au-delà de la capacité à retirer des colis stockés (la « récupérabilité »), l'Andra a conçu la réversibilité comme :

- la possibilité d'un pilotage progressif et « flexible » du processus de stockage laissant aux générations à venir une liberté de décision sur ce dernier,
- la capacité à faire évoluer la conception des ouvrages au cours du processus de stockage.

La réversibilité se traduit donc d'abord par une souplesse de gestion des colis stockés similaire à celle d'un entreposage. Les colis de déchets peuvent être retirés aussi facilement qu'ils sont mis en place, sans détérioration des installations ou des colis eux-mêmes. Les études montrent que cette possibilité est ouverte au moins sur des durées séculaires (un à quelques siècles) sans intervention autre que les opérations classiques de maintenance et de suivi. Mais, contrairement à un entreposage, un stockage peut aussi être fermé pour assurer une protection passive à long terme des personnes et de l'environnement. Dans ce cadre, les possibilités de choix données aux générations futures se traduisent par une fermeture par étapes, permettant, si cela est souhaité, une diminution graduelle de la réversibilité au fur et à mesure des choix effectués. La réalisation progressive des installations de stockage autorise aussi une flexibilité dans le développement de l'installation. Elle offre la possibilité de la faire évoluer pour prendre en compte l'expérience acquise.

Cette approche traduit les principaux choix auxquels seront confrontées les générations futures : envisager d'autres solutions de gestion ou de valorisation des déchets, prendre en compte l'évolution des exigences techniques, économiques et sociales, acquérir des éléments complémentaires sur les choix possibles pour prendre une décision importante, tirer parti de l'amélioration des connaissances.

Dans cette optique, le processus de stockage se décompose en une succession d'étapes ménageant la possibilité d'un temps d'observation, avant de décider de maintenir l'installation en l'état, de passer à l'étape suivante, ou de revenir en arrière. Le passage d'une étape à la suivante n'est pas un choix définitif, « la page que l'on tournerait », mais un choix raisonné, en toute connaissance des paramètres scientifiques, techniques, économiques, sociaux et environnementaux.

A chaque étape, le retour en arrière est possible mais sa complexité technique, les coûts de sa mise en œuvre et les charges induites en terme d'intervention humaine varient. S'il est concevable qu'à mesure de l'acqui-

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile La démarche de conception d'un stockage sûr et réversible

sition de données, on puisse envisager de passer à un niveau de réversibilité moindre, il faut que soient bien connus les éléments qui motivent ce passage, les moyens permettant le cas échéant de revenir en arrière, ainsi que les conditions de ce retour.

Réversibilité : plusieurs étapes de gestion dans la fermeture éventuelle d'un stockage

Plusieurs étapes sont possibles dans un schéma de gestion d'un stockage pouvant conduire à sa fermeture :

- accès toujours possible aux colis dans l'alvéole de stockage,
- scellement de l'alvéole de stockage et accès toujours possible aux galeries desservant l'alvéole,
- remblaiement des galeries d'accès aux alvéoles, puis aux modules de stockage,
- etc. jusqu'au scellement des puits.

De manière simple, le premier niveau de réversibilité peut être assimilé à un entreposage et le dernier correspond à la fermeture (voir chapitre 5). A chaque étape, la récupération des colis est possible selon des modalités plus ou moins complexes.

2.1.2.2 La réversibilité et la durée : plusieurs niveaux

La notion de réversibilité est liée au temps. L'Andra a retenu de ne pas fixer a priori de durée à la réversibilité, mais de raisonner en niveaux de réversibilité associés à des étapes de fermeture.

Pour prendre en compte l'ensemble des colis de déchets dans des conditions techniques et économiques raisonnables, la durée d'exploitation du stockage serait au minimum de plusieurs décennies et pourrait atteindre des durées de l'ordre du siècle. Cette estimation temporelle, fondée sur l'inventaire des colis de déchets français, est du même ordre de grandeur dans les autres pays européens.

Toutefois, la durée réelle d'exploitation ne constitue pas une donnée intangible et elle est susceptible de varier en fonction des décisions à prendre tout au long de l'exploitation. Ces dernières peuvent induire des périodes d'attente, d'une part pour élaborer et instruire les dossiers d'autorisation de stockage ou de fermeture partielle, d'autre part pour des raisons économiques, politiques ou sociales. Cette durée de l'ordre du siècle fournit toutefois un premier ordre de grandeur pour apprécier la durée des processus en cause. Elle constitue en elle-même un des paramètres de la réversibilité puisqu'elle autorise des adaptations et des évolutions sur une longue période.

Chacune des étapes de la gestion réversible du stockage renvoie à un point d'arrêt associé à une prise de décision. Ces « points décisionnels », qui comportent des analyses, des revues et des évaluations sur la base des données acquises, doivent être planifiés. A chaque point décisionnel, les décisions à prendre sont principalement :

- soit de revenir en arrière en déconstruisant une partie ou tous les ouvrages de fermeture déjà en place, jusqu'au retrait partiel ou total des colis de déchets,
- soit d'attendre avant de passer à l'étape suivante pour bénéficier d'un temps d'observation et/ou de surveillance supplémentaire,
- soit de décider de franchir l'étape suivante.

En pratique, les choix possibles sont plus nombreux et peuvent différer selon les types de déchets : on pourrait, par exemple, décider simultanément de retirer certains déchets stockés et d'attendre avant de passer à l'étape suivante pour d'autres déchets stockés.

Par ailleurs, la durée d'ouverture variera suivant les ouvrages : premiers construits et derniers fermés, les ouvrages de liaison (en particulier les puits) devraient être ouverts le plus longtemps.

Toutefois, compte tenu de la fréquence possible des points décisionnels et des constantes de temps des phénomènes, on peut envisager une période de réversibilité du stockage pluriséculaire, sans modification drastique des concepts proposés. Cette durée permet d'intégrer au fil du temps de nouvelles technologies et participe elle-même de la réversibilité en ne figeant pas les solutions techniques.

2.2 La prise en compte de la réversibilité dans la conception du stockage

2.2.1 Des architectures de stockage intégrant et favorisant la réversibilité

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

2.2.1.1 Des concepts de stockage simples et robustes

Les études d'ingénierie ont visé à proposer des concepts de stockage simples et robustes. La simplicité est liée au souci de faisabilité technique ainsi qu'à la maîtrise du comportement. Les options proposées par l'Andra facilitent la description de l'évolution de ces concepts dans le temps ainsi que leur modélisation.

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

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

En outre, plusieurs dispositions concourent à faciliter la gestion réversible du stockage et l'éventuel retrait des colis : par exemple, le regroupement des colis en conteneurs standardisés, le recours à des dispositifs de manutention identiques pour la mise en place et le retrait des colis, etc.

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

Les architectures proposées sont modulaires. Elles permettent ainsi une gestion souple du stockage, par exemple la construction et l'exploitation par étapes, qui facilite en outre l'intégration du retour d'expérience.

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

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

2.2.2 La faisabilité technique d'un retour en arrière

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

Le stockage est ainsi conçu pour permettre, dans la première étape, un retrait des colis par simple inversion du processus de mise en alvéole (comme dans un entreposage). Pour les étapes ultérieures, l'Andra a intégré des dispositions pour pouvoir rouvrir les installations fermées et installer les équipements nécessaires au retrait des colis, si cela était décidé. Elle a examiné les différents processus permettant le retour en arrière. Ce dernier est possible à chaque étape, avec des conditions plus ou moins aisées selon les stades. En tout état de cause, l'étude de la réversibilité implique de disposer, à chaque étape, des outils permettant de revenir en arrière, avant le franchissement de toute nouvelle étape.

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

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

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

Différentes technologies ont été passées en revue en fonction des paramètres à mesurer. Le retour d'expérience lié à la surveillance d'autres ouvrages permet de disposer d'un éventail de solutions pour les principales mesures sur des durées compatibles avec le besoin de réversibilité et de surveillance.

A l'étranger : consensus sur une approche par étapes

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

Pour l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE, l'approche de la réversibilité par étapes successives, suivant un processus prudent et souple, s'inscrit dans les « bonnes pratiques ». L'AEN insiste sur la nécessité de mettre en place des dispositions d'ordre institutionnel, organisationnel, réglementaire, politique et financier, en complément des solutions techniques, pour assurer la récupérabilité des colis et la réversibilité du stockage.

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

36

) ossier 2005 Argile

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile

Les colis

- p.38 > 1. Les déchets de haute activité et à vie longue
- p.42 > 2. Le modèle d'inventaire
- p.50 > 3. Le comportement à long terme des colis
Les colis

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

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

1. Les déchets de haute activité et à vie longue

1.1 Les déchets radioactifs

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

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

Classification des déchets radioactifs

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

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

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

Les colis

Décroissance radioactive, période et types de rayonnements

Un isotope radioactif d'un élément est physiquement instable du fait d'un excès de protons ou de neutrons dans son noyau. Ce dernier peut se transformer spontanément en un autre noyau, stable ou encore radioactif : cette transformation irréversible, ou désintégration, s'accompagne de l'émission d'une particule alpha (noyau d'hélium comprenant deux protons et deux neutrons) ou bêta (électron ou positon), ainsi que d'un photon gamma. La désintégration radioactive d'un noyau donné est un phénomène aléatoire dans le temps. On peut cependant définir pour chaque isotope radioactif une période (ou demi-vie) qui est la durée nécessaire à la désintégration de 50 % de la quantité initialement présente. Ainsi, la période radioactive de l'isotope 14 du carbone (14C) est de 5 730 ans. Au fur et à mesure des désintégrations, il reste une quantité de moins en moins importante d'isotopes radioactifs. Cette diminution progressive de la radioactivité est appelée décroissance radioactive. Après une durée de n périodes d'un isotope radioactif, celui-ci aura décru de 1/2ⁿ par rapport à l'inventaire initial ; ainsi, après dix périodes, il ne reste plus qu'un millième environ de la matière radioactive initiale.

On distingue trois types de rayonnements :

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

1.2 Les déchets de haute activité et à vie longue

1.2.1 Nature et provenance

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



Hall d'entreposage actuel de déchets C

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

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

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

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

1.2.2 Deux catégories de déchets

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



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

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

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

Conteneur standard de déchets vitrifiés (CSD-V)

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

Les radionucléides produits en réacteur

Ils sont de trois types :

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

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

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



Conteneur standard de déchets compactés (CSD-C)



Conteneur béton fibres cylindrique (déchets technologiques)

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

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

Le dégagement thermique des colis de déchets

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

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

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

2. Le modèle d'inventaire

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

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

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

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

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

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

2.1.2 La prise en compte des combustibles usés

Les combustibles usés ne sont pas considérés comme des déchets. Néanmoins, afin d'explorer les problématiques spécifiques qu'ils poseraient vis-à-vis des techniques de gestion, certains scénarios d'études prennent en compte des combustibles usés issus des réacteurs nucléaires d'EDF ou du CEA dans une hypothèse où ils ne seraient pas traités. Les combustibles usés contiennent les radionucléides liés aux réactions de fission (plutonium, actinides mineurs, produits de fission) et présentent une haute activité qui se traduit par un dégagement thermique notable. Ce dégagement thermique est dû à leur contenu en produits de fission à période moyenne, en plutonium et en américium (issu principalement de la décroissance du plutonium) ; ces deux derniers éléments conduisent à une décroissance plus lente dans le temps. Autres caractéristiques des combustibles usés : leurs grandes dimensions et leur contenu plus important en matière fissile (uranium et plutonium) qui induit un risque de criticité.



Piscine de refroidissement de combustibles usés

Assemblages de combustibles usés

Un assemblage de combustibles usés est constitué de crayons en alliage de zirconium contenant les pastilles de combustible d'oxyde d'uranium (UO₂) ou d'oxyde mixte uranium-plutonium (UO₂-Pu), selon qu'il s'agit de combustibles UOX ou MOX. Ces crayons (4 à 5 m de long) sont fermés à leurs extrémités par deux bouchons soudés. Le maintien axial de chaque empilement de pastilles est assuré par un ressort hélicoïdal en partie haute. Les crayons sont maintenus en place par une série de grilles métalliques et un dispositif en partie haute permet la manutention de l'assemblage.

2.1.3 Quatre scénarios pour situer les ordres de grandeur

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

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

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

Les quatres scénarios

• Le scénario S1a suppose le traitement de tous les CU déchargés par le parc EDF actuel (45000 tML, dont 8000 tML d'UOX1, 20500 tML d'UOX2, 13000 tML d'UOX3, 800 tML d'URE et 2700 tML de MOX).

• Dans **les scénarios S1b et S1c**, les 42300 tML d'UOX/URE sont traités. En revanche, les combustibles usés MOX (2700 tML) sont supposés non traités et la faisabilité de leur stockage direct est évaluée. Dans le scénario S1b, les colis de déchets vitrifiés ont une puissance thermique supérieure aux colis actuels. Dans le scénario S1c, leur puissance thermique est équivalente.

• Le scénario S2 a été introduit pour analyser la faisabilité du stockage direct de combustibles usés UOX et MOX. Il table sur le traitement partiel des CU UOX jusqu'en 2010 (8000 tML d'UOX1 et 8000 tML d'UOX2), puis sur un stockage direct de 29000 tML avec 12500 tML d'UOX2, 14000 tML d'UOX3, 500 tML d'URE et 2000 tML de MOX.

2.2 Les colis types du modèle d'inventaire

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

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

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

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

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

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

(Légende du tableau ci-contre)

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

2005 Argile

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile

Liste des colis types du modèle d'inventaire

Colis types	Cat.	Niv.1	Niv.2	Niv.3	Intitulés des déchets regroupés dans les colis types
Déchets activés		B1			CSD-C contenant des déchets activés des réacteurs REP et RNR
Déchata bituraéa		B2	B2.1		Fûts bitumes 238 et 245 litres
Decheta bitamea		DZ	B2.2		Fûts bitumes 428 litres
				B3.1.1	Conteneurs béton 1 000 litres reconditionnés ou non en conteneurs métalliques
			B3.1	B3.1.2	Conteneurs en béton (CAC et CBF-C'2) contenant des déchets technologiques divers
				B3.1.3	Conteneurs béton 1 800 litres contenant des déchets divers
Déchets technologiques			50.0	B3.2.1	Conteneurs béton 500 litres (boues et concentrats)
et divers cimentés ou compactés		B3	B3.2	B3.2.2	Conteneurs béton de 1 200 litres (CBF-C'2) contenant des déchets CEDRA et AGATE
				B3.3.1	Conteneurs standard de déchets compactés (CSD-C) contenant des déchets alpha
			B3.3	B3.3.2	Fûts EIP contenant des déchets pulvérulents cimentés
				B3.3.3	Conteneurs en acier de 500 litres contenant des déchets divers
				B3.3.4	Conteneurs en acier de 870 litres contenant des déchets divers
Déchets de structure cimentés		B4			Fûts de coques et embouts cimentés
	В		B5.1		CSD-C contenant un mélange de coques et embouts et de déchets technologiques (y compris déchets organiques)
Déchets de structure, avec ou sans déchets technologiques,		B5	B5.2		CSD-C contenant un mélange de coques et embouts et de déchets technologiques métalliques
compactés			B5.3		CSD-C contenant des déchets de structure REP (HAO), sans déchet technologique
			B5.4		CSD-C contenant des déchets de structure magnésiens
			B6.1		Conteneurs en acier de 180 litres contenant des déchets d'exploitation AVM
			B6.2		Fûts EIP contenant des déchets de structure métalliques
technologiques mis en fûts		B6	B6.3		Fûts EIP contenant des déchets de structure magnésiens
			B6.4		Futs EIP contenant des dechets technologiques métalliques et organiques
			B6.5		Fûts EIP contenant des déchets technologiques métalliques
			B7.1		Blocs sources
Sources		B7	B7.2		CSD-C contenant les crayons sources primaires et secondaires REP
			B7.3		Fûts EIP contenant des sources scellées
			B8.1		Fûts EIP contenant des fûts de sulfates de plomb radifères
Déchets au radium et à l'américium		B8	B8.2		Conteneurs en acier de 870 litres contenant des têtes de paratonnerres au radium ou à l'américium
			B8.3		Fûts EIP contenant des ORUM
			C0.1		Déchets vitrifiés PIVER
		CO	C0.2		Déchets vitrifiés UMo
Déchets vitrifiés			C0.3		Déchets vitrifiés AVM
	С	C1			Déchets vitrifiés UOX/URE "thermique actuelle"
		C2			Déchets vitrifiés UOX/URE "thermique future"
		C3			Déchets vitrifiés UOX/MOX
		C4			Déchets vitrifiés UOX + Pu
Combustibles REP EDF		CU1			Combustibles usés REP UOX et URE
		CU2			Combustibles usés REP MOX
	CU	CU3	CU3.1		Combustibles usés UNGG et EL4
Combustibles CEA			CU3.2		Combustibles usés Célestin
			CU3.3		Combustibles usés de la propulsion nucléaire

2.2.2 Quelques caractéristiques d'ensemble des colis types

2.2.2.1 Les colis de déchets B

Les déchets B rassemblent plusieurs colis types :



Fût en inox de 245 litres (bitume)

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

 les autres colis types, B3 (déchets technologiques et divers cimentés), B4 (déchets coques et embouts cimentés), B6 (déchets technologiques variés) présentent, quant à eux, une grande diversité de déchets et de modes de conditionnement.

Des dégagements de gaz

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

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

³ appelé REP. 4 appelé RNR.

2.2.2.2 Les colis de déchets C

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

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



Colis primaires C

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

Le conteneur utilisé à l'atelier de vitrification de Marcoule (AVM, colis type C0.3) diffère du CSD-V par son diamètre (500 mm) et sa hauteur (1015 mm).

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

2.2.2.3 Les combustibles usés

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

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

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

2.2.3 Des inventaires quantitatifs selon les scénarios

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

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

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

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

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

Nombre d'assemblages de combustibles usés, le cas échéant

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

2.2.4 L'inventaire radiologique

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

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

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

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

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



• Les actinides

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



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

L'inventaire chimique des colis primaires de déchets

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

Les aciers inoxydables et certains alliages contiennent du nickel et du chrome. Les déchets B, et dans une moindre mesure les déchets C, peuvent également contenir de l'aluminium ou du magnésium. Le verre des déchets C contient du bore, élément chimique toxique lorsqu'il n'est pas immobilisé, qui

est un constituant de la matrice vitreuse.

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

3. Le comportement à long terme des colis

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

3.1 Les colis de déchets C

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

- le modèle « V₀→V_r » est applicable aux verres produits par l'usine COGEMA de La Hague (R7T7) depuis les années 1980, ou aux verres futurs qui seront produits selon des procédés similaires (colis types C1 à C4). Il rend compte des observations : d'abord une vitesse initiale (V₀) de dissolution, non contrôlée par la concentration de l'eau en silice (du fait des interactions avec les matériaux environnants), puis un ralentissement de cette vitesse vers une vitesse résiduelle (V_r) après saturation en silice des matériaux voisins. Ce modèle conduit à des durées de vie des matrices vitreuses de plusieurs centaines de milliers d'années au moins,

⁵ Le scénario S2 correspond à des ordres de grandeur similaires : 7.10⁺¹⁷ Bq pour les produits d'activation et de fission (hors ⁶³Ni) et 1,7.10¹⁹ Bq pour les actinides.



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

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



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

Schéma d'un colis primaire de déchet C vitrifiés R7T7

3.2 Les colis de boues bitumées (colis types B2)

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

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

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

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

Les radionucléides contenus par ces déchets se trouvent :

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

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

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

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

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



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

3.4 Les autres colis B

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

3.5 Les combustibles usés

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

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

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

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

Ces différents éléments conduisent à retenir pour les combustibles :

- une fraction labile (c'est-à-dire relâchée dès l'arrivée d'eau) comprise entre 10 et 35 % de l'inventaire radioactif des combustibles, selon les types d'assemblages (UOX ou MOX),
- un taux de relâchement décroissant dans le temps pour les pastilles, *conduisant à un relâchement étalé sur 50 000 à 100 000 ans selon le taux de combustion (valeur pessimiste a priori),*
- un relâchement des produits d'activation localisés dans les éléments de structure sur environ 20000 ans.



Assemblages de combustibles

53

Dossier 2005 Argile ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile

Le milieu géologique : le site de Meuse/Haute-Marne

p.57 > 1. Les fonctions attendues du milieu géologique

p.61 > 2. Les caractéristiques du site de Meuse/Haute-Marne : le recueil des informations – Les grandes étapes

p.82 > 3. Les connaissances acquises

p.100 > 4. La transposition des résultats du laboratoire à une plus grande échelle

Le milieu géologique : le site de Meuse/ Haute-Marne

Le concept de stockage en profondeur repose sur l'idée qu'il existe des formations géologiques capables d'assurer le confinement des colis de déchets qui y seraient déposés, sur de très longues durées, jusqu'à ce que les déchets reviennent à un niveau de radioactivité négligeable. Ce sont le milieu géologique (argile, granite, sel...) et les architectures de stockage qui doivent assurer, à très long terme, le confinement des radionucléides à vie longue qui pourraient être relâchés dans la biosphère afin de protéger les personnes et l'environnement. Le milieu géologique se place ainsi au cœur du système de stockage.

Les travaux menés par l'Andra sur l'argile visent à concevoir un stockage en profondeur :

- qui place les colis de déchets à l'abri des phénomènes d'érosion et des principales activités humaines en les éloignant de la surface,
- qui mobilise les propriétés, notamment de confinement, de la formation géologique, choisie comme barrière pour s'opposer à la dissémination des radionucléides contenus dans les déchets, ou la ralentir au maximum (absence de circulation d'eau, milieu réducteur). Ces propriétés doivent être appréciées et garanties sur de très longues échelles de temps (du millier d'années à plusieurs centaines de milliers d'années),
- qui préserve les propriétés favorables du milieu géologique sur de très longues durées malgré les perturbations (thermiques, chimiques et mécaniques) imposées au milieu tant par les colis de déchets qui peuvent émettre de la chaleur que par la construction, l'exploitation et la dégradation des constituants du stockage (colis, alvéoles, galeries) à long terme.

RFS III.2.f. Au sens le plus général, le système de confinement est constitué par un ensemble de moyens ou de dispositifs interdisant ou limitant, à un niveau spécifié, le transfert des matières radioactives vers la biosphère.

Dans le cas du stockage en formation géologique profonde, le système de confinement est constitué des trois barrières suivantes :

- les colis de déchets,
- les barrières ouvragées,
- la barrière géologique. Elle est constituée par les formations géologiques du site,

Les barrières du système de confinement jouent des rôles complémentaires, la barrière géologique assurant un rôle essentiel en particulier à long terme.

3

1. Les fonctions attendues du milieu géologique

Par la nature et l'agencement de leurs minéraux ainsi que par leur forte compacité et leur faible perméabilité, les formations argileuses profondes, comme celle du Callovo-Oxfordien du site de Meuse/Haute-Marne âgée d'environ 155 millions d'années, présentent des propriétés intrinsèques intéressantes pour l'étude d'un stockage géologique de déchets radioactifs HAVL :

- *les circulations d'eau*, principal facteur susceptible d'altérer les colis et de dissoudre et transporter les radionucléides dans le stockage, *y sont faibles*,
- *la chimie du milieu reste stable* dans le temps quelles que soient les perturbations dues à la dégradation des matériaux utilisés pour les ouvrages de stockage, ce qui garantit le maintien des propriétés de confinement des argiles,
- le comportement mécanique de ces formations limite les perturbations (microfissuration, fracturation) dues au creusement des installations souterraines et susceptibles d'augmenter la perméabilité de la roche à proximité immédiate des galeries.

Par ailleurs, ce milieu géologique présente en grand :

- *une stabilité géologique à long terme,* assurée par un contexte géodynamique très peu actif (sismicité faible en particulier) et par la profondeur de la couche (500 m) la mettant à l'abri de l'influence de processus de surface (érosion et changements climatiques),
- *une homogénéité de la couche argileuse* liée à un environnement de dépôt peu variable et à une histoire géologique peu perturbée par les mouvements tectoniques et les interactions entre fluides et roches.

1.1 L'argilite : des propriétés pour le stockage de colis de déchets radioactifs



Argilite observée au microscope électronique à balayage (dans la matrice argileuse, on distingue au microscope, P : macroporosité, Q : grain de quartz, Cal : grain de calcite)

Les propriétés de l'argilite, en tant que roche, sont la conséquence de son agencement minéralogique. Elle est principalement constituée de :

- *minéraux argileux* composés de cristaux microscopiques en forme de feuillets dont les éléments principaux sont la silice et l'alumine et entre lesquels des molécules d'eau sont piégées. Ces feuillets sont chargés électriquement à leur surface, ce qui leur permet de retenir certains éléments chimiques (magnésium, sodium, calcium, césium, strontium) que l'on retrouve dans les déchets. *L'argilite a des propriétés de rétention ;*
- *carbonates,* principaux constituants des roches calcaires, qui sont en équilibre chimique avec le gaz carbonique dissous dans l'eau. Ce sont eux qui régulent le pH du milieu. Leur part importante dans l'argilite (25% du volume) permet au milieu de conserver la même acidité (pH). *Le milieu chimique est stable,*
- quartz, minéral résistant et bon conducteur de chaleur. La roche est solide et présente des capacités à évacuer la chaleur compatibles avec la puissance thermique des déchets radioactifs.

1.1.1 Une très faible perméabilité



Les particules solides d'argilite laissent entre elles des espaces libres, les pores où se trouvent les fluides interstitiels, c'està-dire de l'eau en petite quantité. La porosité (pourcentage de vides par rapport au volume total de la roche) est faible (entre 10 et 18%) et le rayon des pores est extrêmement petit (inférieur au 1/10° de micron) : la moitié des molécules d'eau reste « bloquée » à la paroi des pores. Cette géométrie particulière de la porosité des argilites explique que les circulations d'eau y soient limitées à l'extrême : on parle de très faible perméabilité des argilites.

Reconstitution 3D d'un échantillon d'argilite (volume de l'ordre du mm³) à partir d'images obtenues en microtomographie : a) Restitution du volume de l'échantillon et des différents constituants minéraux. b) Visualisation de la macroporosité dans l'échantillon (d'après Sammartino, 2005).

1.1.2 Un mode de transport diffusif des radionucléides dissous dans l'eau et des capacités à retarder leur migration dans l'environnement

Dans les argilites, les éléments chimiques, radioactifs ou non, dissous dans l'eau se déplacent principalement par diffusion (c'est-à-dire sous l'effet de leur mouvement propre) et non par convection (entraînés par l'eau en mouvement). La convection est très réduite dans la couche d'argilite en raison de sa faible perméabilité et de l'absence d'un moteur hydraulique efficace qui s'appuierait sur des différences de pression d'eau significatives aux limites de la couche. Ainsi, la diffusion, mécanisme de transport lent et impliquant des temps de transfert vers l'environnement de plusieurs centaines de milliers d'années, est dominante.

Dans les pores de l'argilite, les radionucléides dissous dans l'eau sous forme d'ions (c'est-à-dire chargés électriquement) se déplacent et entrent en contact avec les minéraux argileux qui développent de grandes surfaces de contact :

- ceux qui sont chargés positivement (les cations) peuvent se fixer sur ces surfaces ou entre les feuillets des minéraux argileux et sont ainsi retenus (on parle de *sorption ou de rétention*),
- ceux qui sont chargés négativement (les anions) sont, du fait de l'étroitesse des pores des argilites, repoussés par ces surfaces, ce qui ralentit leur migration (on parle d'*exclusion anionique*).

1.1.3 Une capacité à absorber les perturbations chimiques (« effet tampon »)

La construction et l'exploitation d'un éventuel stockage vont faire pénétrer des éléments extérieurs dans l'argilite : ainsi, l'introduction d'air dans la roche provoque l'oxydation de certains constituants, en particulier pyrite (sulfure de fer naturel) et matières organiques. De plus, certains éléments sont produits par la dégradation à terme des matériaux du stockage, bétons et ciments notamment : ainsi, la dégradation des bétons relâche des éléments alcalins qui augmenteront le pH de l'eau, conduisant à une dissolution du quartz et des minéraux argileux et à la précipitation de calcite et d'autres minéraux silicatés, tels que les zéolites. Toutefois, le rapport de masse entre les minéraux de la formation-hôte et les éléments étrangers qui y pénètrent est si grand que les perturbations chimiques engendrées par le stockage sont limitées en extension à quelques décimètres (on parle d'effet tampon des argilites).

3

1.1.4 Une résistance mécanique et une conductivité suffisantes



Géologues dans le puits principal du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne

La qualité géotechnique de la roche doit être appréciée pour pouvoir dimensionner les ouvrages souterrains, vérifier la faisabilité de leur creusement, en particulier s'assurer que la construction des ouvrages ne provoque pas, à leur voisinage, des fracturations pouvant faciliter des circulations d'eau qui réduiraient une partie des propriétés de confinement initiales du milieu géologique. En règle générale, les formations argileuses ne sont pas réputées pour leur résistance mécanique ou leur capacité à évacuer la chaleur. Cependant, par leur constitution minéralogique et leur compacité, certaines argilites, comme celles du Callovo-Oxfordien, présentent des caractéristiques plus favorables.

La proportion notable de carbonates et leur distribution dans la roche donne une *bonne résistance mécanique* aux argilites du

Callovo-Oxfordien face aux endommagements induits par la construction d'installations souterraines. De plus, la présence de minéraux argileux de type smectite leur assure, grâce à leurs propriétés de gonflement, *une certaine déformabilité (qui facilite notamment la cicatrisation des terrains endommagés) et une aptitude au fluage,* c'est-à-dire une capacité à accommoder progressivement les déformations dans le temps (viscosité).

La présence de quartz leur confère en outre *une conductivité thermique convenable, suffisante pour dissiper la chaleur* produite par la radioactivité des déchets sans que l'augmentation de température ait d'effet significatif sur leur résistance mécanique et leur déformation à court terme.

1.2 La formation-hôte argileuse : caractéristiques physiques recherchées pour un stockage en profondeur sur de très longues durées

Outre les qualités liées à la nature de l'argilite, la formation-hôte doit présenter certaines caractéristiques physiques favorables à l'implantation et à l'exploitation d'un stockage en profondeur sur de très longues durées.

1.2.1 La capacité à accueillir un stockage

La formation-hôte doit pouvoir assurer le confinement sur toute la surface du stockage. Elle doit donc être :

- suffisamment épaisse sur toute cette surface pour isoler les déchets des venues d'eau provenant des couches sus-jacentes ou sous-jacentes au stockage et retenir les radionucléides,
- suffisamment homogène et sans, ou avec peu, de discontinuités à la fois physiques (absence de fractures) et minéralogiques (homogénéité dans sa composition). Plus la structure des formations géologiques est simple (par exemple, empilement de couches horizontales), plus ces caractéristiques sont faciles à appréhender.

Il faut aussi pouvoir construire les ouvrages souterrains dans des conditions satisfaisantes de sécurité et raisonnables en terme de coût sans réduire les propriétés de confinement initiales. Plus la formation-hôte est située en profondeur, plus la pression des terrains est forte et plus le creusement et le soutènement des ouvrages nécessitent de précautions.

1.2.2 L'assurance du maintien à long terme de la capacité à retenir les radionucléides pour ralentir leur dispersion

La connaissance des mécanismes de mise en place des formations géologiques et de leurs transformations postérieures est importante pour l'étude de faisabilité d'un stockage. Elle permet de s'assurer de leur stabilité passée (sur plusieurs millions d'années), tout en s'interrogeant sur le devenir des conditions de stabilité. Elle permet aussi d'établir un modèle de l'évolution à long terme de ces formations.



Concentrations en cations majeurs de l'eau interstitielle du Callovo-Oxfordien, des eaux du Dogger et de l'Oxfordien Leurs différences soulignent les échanges très limités entre ces fonctions.

Les formations argileuses en profondeur sont *stables dans le temps* et jouent souvent le *rôle de barrière de perméabilité*. Elles se comportent comme des « systèmes clos » et les échanges avec les formations géologiques qui les entourent sont très faibles. C'est en particulier le cas dans les systèmes pétroliers dans lesquels les couches argileuses se comportent comme des barrières empêchant la migration des hydrocarbures accumulés dans les niveaux réservoirs sous-jacents.

1.2.3 La stabilité du bâti géologique sur le long terme

La reconstitution des déplacements subis par le bâti géologique durant son histoire et des déformations qui en résultent permet de juger de la dynamique de la région et de suivre dans le temps les différents épisodes tectoniques ayant affecté la croûte continentale à l'échelle locale. On doit, sur de telles bases, s'assurer que le site étudié est éloigné des zones soumises à des déformations tectoniques (pour la France, le rift « ouest européen » et les Alpes en particulier).

L'activité tectonique de la région du site de Meuse/Haute-Marne est très faible (activité sismique restreinte, faibles déplacements de la croûte, orientation pérenne des contraintes) et le bâti géologique est stable, comme l'atteste l'absence d'indices quaternaires d'activité tectonique sur les failles encadrant le secteur d'étude. Dans ces conditions, les mouvements tectoniques possibles sont limités à de très faibles rejeux de failles préexistantes qui structurent le socle.

La topographie sera affectée sur le long terme (évolution géomorphologique) par des processus d'érosion ou de comblement selon des mouvements de soulèvement (surrection) ou d'affaissement. La reconstitution des paléosurfaces sur le bassin de Paris permet de préciser les vitesses d'érosion et de juger de la stabilité régionale et temporelle. Dans un contexte tectonique peu ou pas actif, la vitesse de surrection restera très faible et constante pendant les prochains millions d'années.

1.2.4 L'existence de faibles gradients hydrauliques locaux, verticaux dans la formation-hôte et horizontaux dans les formations aquifères encaissantes

Plus les gradients sont faibles, plus les circulations d'eau sont lentes. Leur connaissance nécessite de caractériser la perméabilité et la charge hydraulique (pression) de la formation-hôte et des encaissants (formations sous et sus-jacentes). Il faut aussi identifier les voies par lesquelles les radionucléides sont susceptibles de se disperser et risquent de rejoindre la biosphère et vérifier que, sur les périodes visées, les circulations d'eau ne seront pas modifiées par les changements climatiques et les modifications du relief.



Les propriétés du milieu mobilisées pour les fonctions de sûreté

Fond	ctions	Période	Propriétés mobilisées
1 - S'opposer à la circulation	n d'eau	Après fermeture	Faible perméabilité
2 - Limiter le relâchement d et les immobiliser dans l	es radionucléides le stockage		
Γ	Protéger les déchets métalliques de la corrosion	Après fermeture	Faible perméabilité
• Déchets B	Protéger le bitume d'enrobage (déchets bitumés) : température, déformations, pH	Toutes	Faible perméabilité, capacité à tamponner les perturbations
Dáchats C vitrifiás	Interdire l'arrivée d'eau sur le verre pendant la phase thermique	Phase thermique	Faible perméabilité
· Dechets C vitimes	Limiter le transport des espèces dissoutes au voisinage du verre	Après fermeture	Faible vitesse de diffusion des éléments dissous
• Combustibles usés	Interdire l'arrivée d'eau sur les assemblages pendant la phase thermique	Phase thermique	Faible perméabilité
	Limiter le transport des espèces dissoutes au voisinage	Après fermeture	Faible vitesse de diffusion des éléments dissous
Limiter la dissolution des radionucléides, assurer des conditions chimiques réductrices		Après fermeture	Faible perméabilité, capacité à tamponner les perturbations
Filtrer les colloïdes		Après fermeture	Petite taille des pores
3 - Retarder et atténuer la m	igration des radionucléides		
Contrôler la migration par dispersion dans la formati	diffusion, rétention, on d'accueil	Après fermeture	Faible vitesse de diffusion des éléments dissous

2. Les caractéristiques du site de Meuse/ Haute-Marne : le recueil des informations, les grandes étapes

L'acquisition des connaissances sur le milieu géologique du secteur de Meuse/Haute-Marne (formation-hôte du Callovo-Oxfordien et formations encaissantes du Dogger, de l'Oxfordien et du Kimméridgien) s'organise autour de plusieurs démarches complémentaires :

- 27 forages profonds de plusieurs centaines de mètres et les campagnes sismiques 2D (1994-1996) et 3D (début 2000) sur le site, des études de terrains pour observer les formations à l'affleurement, à l'échelle tant du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne que du secteur, appréhender les grands traits de l'environnement géologique et prélever des échantillons,
- des analyses en laboratoire et des expériences, en particulier à Mol (Belgique) et au Mont Terri (Suisse), pour tester les méthodes et les outils et valider les modèles,
- le creusement des puits à partir de l'année 2000 pour observer le milieu *in situ* et apprécier son comportement à échelle réelle,

61

- le creusement des galeries expérimentales à - 445 m à partir de 2004 et à - 490 m à partir de 2005 et les expérimentations associées.

Ces travaux visent à acquérir une compréhension fine de l'environnement géologique du site de Meuse/Haute-Marne pour :

- s'assurer que cet ensemble géologique, en particulier la couche argileuse du Callovo-Oxfordien, présente les propriétés attendues,
- évaluer son comportement à long terme, notamment l'effet des perturbations que l'implantation d'ouvrages de stockage lui ferait subir.

Les observations, mesures et analyses de l'état actuel du site et des propriétés de la couche argileuse du Callovo-Oxfordien ont permis d'*élaborer une représentation du site* (on parle de modèle conceptuel) donnant une reconstitution de son histoire géologique passée et présentant son évolution future. Cette représentation, cohérente avec les données sédimentologiques, structurales, hydrogéologiques, géomécaniques et géochimiques acquises, *sert de base aux simulations permettant d'évaluer les performances du stockage*.

2.1 1994-1996 : appréhender les grands traits de l'environnement géologique du site de Meuse/Haute-Marne

Cette première étape a permis à l'Andra :

- de confirmer l'intérêt des argilites du Callovo-Oxfordien et de leur contexte géologique sur une zone de plusieurs centaines de km², située à cheval sur le sud de la Meuse et le nord de la Haute-Marne,
- puis de sélectionner un site d'études pour le Laboratoire de recherche souterrain.

2.1.1 Vérifier la disposition des couches géologiques

En 1994, l'Andra a rassemblé et traité les nombreuses données géologiques et hydrogéologiques issues des prospections pétrolières menées dans le département de la Meuse et au nord de la Haute-Marne : cartographies géologiques de surface, informations hydrogéologiques des puits et sources et, surtout, campagnes géophysiques sismiques. *1300 km de profils sismiques ont été acquis et étudiés à partir des données de 68 forages pétroliers régionaux.*

Après cet inventaire, le nord de la Haute-Marne et le sud de la Meuse sont apparus comme un domaine géologiquement simple du bassin de Paris :

- *il s'agit d'une succession de couches pratiquement horizontales :* calcaires, marnes, roches argileuses qui se sont déposées dans d'anciens océans ;
- la couche retenue pour l'étude est un niveau de roche argileuse de 130 m au moins d'épaisseur formée il y a 155 millions d'années et située à une profondeur comprise entre 400 et 600 m : les argilites du Callovo-Oxfordien.



ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le milieu géologique : le site de Meuse/Haute-Marne

Carte géologique du secteur de Meuse/Haute-Marne

3

Succession des couches à partir de la surface sur le secteur d'études

Géologiquement le sud du département de la Meuse et le nord du département de la Haute-Marne appartiennent à la bordure orientale du bassin parisien. Celui-ci a une forme de cuvette emplie d'une succession de couches sédimentaires dont les plus anciennes sont situées sur les bordures et au fond de la cuvette et les plus récentes au centre.

Formation	Age (années)	Epaisseur au droit du site	Caractéristiques
Calcaires du Barrois	Tithonien 140 millions	±25 m	Aquifère de surface
Marnes	Kimméridgien 145 millions	100 m	Imperméable
Oxfordien calcaire	Oxfordien supérieur à moyen 150 millions	300 m	Peu perméable
Argilites du Callovo-Oxfordien	Oxfordien inférieur-Callovien supérieur et moyen 155 million	130 m s	Couche-hôte sélectionnée
Dogger calcaire	Callovien inférieur - Dogger 165 millions	250 m	Peu perméable



Coupe géologique sur le site du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne



Le secteur des recherches de l'Andra

Il est limité par :

- au sud-est, le fossé de Gondrecourt-le-Château de direction nord-est/sud-ouest,
- au sud-ouest, le fossé de la Marne orienté nord/nord-ouest. Il est prolongé vers le sud par la faille de Poisson qui lui est parallèle,
- vers le nord, la structure d'Aulnois-Saint-Amand qui correspond à une légère inclinaison des couches.

La formation du Callovo-Oxfordien est composée de roches argileuses, les argilites, dont l'épaisseur est comprise entre 130 et 160 m sur le secteur étudié. L'ensemble des couches constituées par le Callovo-Oxfordien et ses encaissants y est pratiquement horizontal avec un faible plongement de 1° à 1,5° vers l'ouest et le centre du bassin parisien.

2.1.2 Acquérir les premiers éléments pour caractériser la couche argileuse du Callovo-Oxfordien

L'objectif en 1994 était de faire une première caractérisation des propriétés des différentes formations, plus spécifiquement de la formation du Callovo-Oxfordien, à grande maille à partir de forages carottés. Des travaux de cartographie géologique en surface ont précisé les cartes existantes. Deux forages carottés profonds, HTM 102 (-1100 m) en Haute-Marne et MSE 101 (-920 m) en Meuse, distants de 15 km, ont confirmé la disposition géologique simple du secteur d'étude. L'Andra a enregistré, avec des outils de diagraphie développés pour l'industrie pétrolière, des paramètres en continu sur toute la hauteur de ces forages (résistivité électrique, vitesse du son, porosité, densité...), prélevé des carottes (échantillons cylindriques de roche) pour analyses et essais en laboratoire et réalisé des mesures hydrogéologiques.

Ces analyses, mesures et essais ont :

- permis d'avoir un premier aperçu des propriétés géomécaniques, thermiques, géochimiques et hydrogéologiques de la roche,
- confirmé sa très faible perméabilité,
- montré que les propriétés de la formation argileuse ne présentaient pas de caractère rédhibitoire pour l'étude de la faisabilité d'un stockage et qu'à cette maille d'investigations, elles ne variaient que très faiblement,
- mis en évidence l'absence de ressource notable en eau dans les formations calcaires encadrant la couche argileuse du Callovo-Oxfordien (débit insuffisant pour alimenter un captage d'eau). Ce résultat est important car il témoigne d'un contexte hydrogéologique favorable dans des couches géologiques qui peuvent contenir de l'eau dans d'autres régions du bassin de Paris.

L'ensemble de ces travaux a conduit à sélectionner le site de Bure pour installer le Laboratoire de recherche souterrain, l'étude préliminaire des propriétés mécaniques de la formation argileuse ayant par ailleurs montré la possibilité d'y creuser les ouvrages nécessaires au Laboratoire (puits et galeries).

Différentes échelles d'étude

Différents termes sont utilisés pour faire référence à l'échelle du domaine d'étude ou aux extensions géographiques des observations.

Le bassin de Paris, ensemble sédimentaire s'étendant d'est en ouest de la Lorraine à la Normandie et, du sud au nord, du Poitou au nord de la France.

On fait également référence à l'échelle régionale pour qualifier une zone d'environ 10 000 km², correspondant à la partie est du bassin de Paris où est situé le secteur d'études.

Le secteur de Meuse/Haute-Marne correspondant à une zone de 40 km d'est en ouest et de 60 km du nord au sud approximativement centrée sur le laboratoire. Le secteur est limité à l'est, au sud et à l'ouest par le fossé de Gondrecourt et les failles de la Marne. C'est sur cette zone qu'ont été réalisées les études de terrain détaillées et implantés les forages de l'Andra.

Le site du laboratoire, correspondant à l'extension des investigations détaillées menées sur le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, soit quelques km².

Enfin, **la zone de transposition** est définie comme la superficie sur laquelle les propriétés du Callovo-Oxfordien et la géologie des formations encaissantes sont similaires à celles déterminées sur le site du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (voir paragraphe 4 du présent chapitre). Elle représente une extension de l'ordre de 200 km².



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

3

2.1.3 Préciser les caractéristiques du site d'un éventuel Laboratoire de recherche

Les travaux de 1995-1996 ont apporté des informations pour définir le programme expérimental du Laboratoire souterrain et en concevoir l'architecture.

• Une campagne de géophysique sismique de haute résolution (sismique 2D) a précisé la disposition des couches géologiques. Trois profils sismiques, longs de 15 km au total, ont complété le réseau de profils pétroliers disponibles à une maille plus fine de 2 km autour du site pressenti du Laboratoire.

- Trois forages carottés ont complété la reconnaissance avec des objectifs spécifiques :
- le forage EST103 (-523 m) a précisé la nature lithologique, minéralogique et géochimique des argilites du Callovo-Oxfordien. Des équipements hydrogéologiques y ont été installés pour mesurer en continu les pressions d'eau dans les calcaires de l'Oxfordien sus-jacent : ces travaux ont confirmé l'absence de ressource en eau dans ces niveaux. De plus, les mesures sismiques faites dans ce forage ont été couplées avec les profils issus de la campagne de géophysique 2D afin de préciser la représentation des différentes couches du sous-sol,
- le forage EST104 (-530 m) a précisé la distribution spatiale des propriétés géomécaniques et géochimiques de la couche argileuse du Callovo-Oxfordien,
- le forage EST106 (-150 m) a permis de reconnaître les qualités géomécaniques des terrains proches de la surface (calcaires du Barrois et marnes du Kimméridgien) pour déterminer les méthodes de creusement des puits d'accès au Laboratoire souterrain et de réalisation des bâtiments de surface du Laboratoire.

• Un forage complémentaire, EST107 (-425 m), a été réalisé sur la plate-forme du forage HTM102 et un appareillage de mesure de pression hydraulique (sonde EPG « electromagnetic pressure gauge »), transmettant ses données en surface par des ondes électromagnétiques, a été installé au centre de la couche du Callovo-Oxfordien et a suivi la pression dans la couche en continu depuis 1996.

Les travaux de 1995-1996 ont permis de disposer sur le site des éléments de caractérisation géologique préliminaire à l'installation éventuelle d'un Laboratoire souterrain.

2.2 1996-2004 : les travaux au Laboratoire souterrain de Mont Terri (Suisse)

Dès 1996, l'Andra a préparé le programme expérimental du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne au cas où elle obtiendrait l'autorisation de le construire et de l'exploiter, les expériences antérieures menées au laboratoire de Mol (Belgique) ayant montré que la mise au point du matériel spécifique et des protocoles expérimentaux nécessite du temps.

L'Andra rejoint le projet de création d'un consortium international pour réaliser des expérimentations in situ dans le tunnel routier du Mont Terri (canton et république du Jura) : le calendrier envisagé était compatible avec celui de l'Andra, le panel d'expériences proposées correspondait en grande partie à son programme expérimental et les caractéristiques des argilites de Mont Terri (appelées argiles à Opalinus) faisant l'objet des expérimentations sont proches de celles des argilites du Callovo-Oxfordien. Les expériences sont menées par plusieurs partenaires ce qui permet de partager les travaux, confronter les idées, synthétiser les connaissances et gagner du temps dans la préparation des expériences.

• Les premières actions (1996-1997) ont permis de tester des outils ou des méthodes : collecte d'eau interstitielle de l'argile à Opalinus in situ à partir de forages, mesure de la pression interstitielle et des contraintes naturelles dans la formation, optimisation des méthodes de forage...

• **Depuis 1998**, la coopération, élargie à huit partenaires de sept pays, a porté davantage sur des expériences visant à acquérir des données scientifiques sur les processus gouvernant le comportement des argiles : tests de diffusion d'éléments chimiques dans la roche, etc.

• **Depuis 2002**, un programme vise à valider à grande échelle les modèles définis à partir des données du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne : expériences de diffusion, de caractérisation des gaz, de géochimie, de chauffage pour évaluer le comportement mécanique de la roche. Il comporte aussi des essais d'ingénierie en grandeur nature : essais de creusement et de ventilation de galeries, de mise en place de barrières ouvragées, de saignées pour intercepter la zone endommagée par le creusement et rétablir la continuité du milieu géologique.



Laboratoire d'expérimentation du Mont Terri

Les expérimentations réalisées à Mont Terri répondaient à deux nécessités :

- préparer dans les meilleures conditions les expérimentations du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, si sa construction était décidée. Une partie des matériels mis au point pour le Mont Terri a été réutilisée dans le laboratoire de Meuse/Haute-Marne et les protocoles expérimentaux ont intégré le retour d'expérience des expérimentations au Mont Terri aboutissant ainsi à un gain de temps précieux,
- valider en grandeur nature les modèles élaborés sur des échelles réduites pour le Callovo-Oxfordien en tenant compte des limites de transposition (matériaux proches d'un point de vue minéralogique et physique, mais contextes et histoires géologiques différents). Au final, le but a été de s'assurer que les modélisations du Callovo-Oxfordien ont une validité à grande échelle.

Argile à Opalinus du Mont Terri et argilites de Bure : des similitudes

L'argile à Opalinus est la formation géologique étudiée par la Nagra sur le site du Mont Terri et au nord de la Suisse (Zürcher Weinland). Légèrement plus ancienne (180 millions d'années), elle présente néanmoins des caractéristiques comparables au Callovo-Oxfordien. Cette roche argileuse a une composition minéralogique (argiles, quartz et carbonates) proche de celle de la partie médiane du Callovo-Oxfordien, bien que légèrement moins carbonatée. Comme les argilites du Callovo-Oxfordien, les argiles à Opalinus constituent un milieu réducteur, peu perméable et présentent une porosité de petite taille. Leurs propriétés de transfert sont similaires (diffusion dominante), de même que leurs propriétés mécaniques. Bien qu'influencée par la tectonique alpine dans le secteur du Mont Terri, l'histoire de l'argile à Opalinus (enfouissement, diagenèse) ne se différencie pas notablement de celle du Callovo-Oxfordien.

Cette formation constitue donc un élément de comparaison pertinent avec celle étudiée sur le site de Meuse/Haute-Marne. En particulier, le retour d'expérience de près de dix ans de travaux scientifiques au Mont Terri a montré que les observations et analyses effectuées sur échantillons étaient confirmées par les expérimentations *in situ*. Ainsi, les modèles développés pour l'argile à Opalinus ont pu être transposés au Callovo-Oxfordien, par exemple pour la détermination de la chimie de l'eau porale ou pour la validation de cœfficients de diffusion.



2.3 1999-2005 : le programme expérimental du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne



Vue du puits principal du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne

La publication en août 1999 du décret d'autorisation du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne à Bure amorce une nouvelle étape du programme de recherche après plusieurs années de travaux de reconnaissance régionale et d'études au laboratoire du Mont Terri.

Ce programme vise à fournir, en les justifiant, les données nécessaires à la modélisation des phénomènes identifiés comme importants pour la conception et l'évaluation de la sûreté d'un stockage éventuel : vérification des propriétés favorables de la formation (extension des perturbations dues à un stockage, capacité de confinement et modalités de transfert de radionucléides dans le Callovo-Oxfordien), constructibilité d'un stockage et capacité à gérer l'endommagement de la roche.

Outre les expériences et les mesures directes sur les argilites dans les galeries du laboratoire à partir de 2004 (galerie à -445 m creusée à partir du puits principal) et de 2005 (galeries à -490 m creusées à partir du puits auxiliaire), le creusement et la réalisation des deux puits entre 2000 et 2005 se sont accompagnés de nombreux travaux scientifiques visant à observer en détail, dans l'Oxfordien et le Callovo-Oxfordien, la géologie des terrains au cœur de la roche, suivre les perturbations hydrauliques et mécaniques et évaluer l'endommagement de la roche.

Le programme de recherche comporte aussi des forages et des campagnes sismiques destinées à approfondir les connaissances sur la couche hôte et les formations qui l'entourent (les «encaissants»).

Le Laboratoire de recherche souterrain

Il est un outil privilégié pour :

- confirmer la connaissance géologique des argilites du Callovo-Oxfordien, évaluer leur capacité de confinement, définir l'architecture d'un stockage,
- effectuer des mesures *in situ* directement sur les argilites, ou des prélèvements, pour préciser leurs propriétés de confinement,
- mener des expérimentations plus globales pour déterminer les possibilités de construction des ouvrages d'un stockage en intégrant les perturbations provoquées par leur réalisation.

Le programme d'études implique aussi d'autres moyens : travaux de reconnaissance complémentaires (forages et investigations par sismique réflexion), essais et analyses sur échantillons dans des laboratoires de surface.

RFS III.2.f. Les objectifs du laboratoire souterrain devront notamment être :

- d'effectuer des mesures sur les roches en place ou sur des fluides aussi peu perturbés que possible par les conditions de l'expérience, afin d'améliorer la connaissance des paramètres déjà évalués en partie lors du programme de reconnaissance mené à partir de la surface,
- de déterminer, par des expériences à caractère plus global, le comportement des différentes roches et des fluides, en prenant en compte les phénomènes naturels et les modifications provoquées par la réalisation du stockage,
- de reconnaître le milieu, notamment sa variabilité dans l'espace, pour évaluer la capacité du site, puis l'emplacement possible des galeries et futurs ouvrages de stockage,
- de déterminer les méthodes de creusement, de rebouchage et de scellement des cavités.

Mesures in situ et sur échantillons

Des mesures devront être effectuées au laboratoire, pour confirmer ou préciser les valeurs des paramètres et pour apprécier leur anisotropie, leur distribution spatiale, ainsi que les effets d'échelle. Parmi les investigations à mener, il conviendra :

- d'évaluer la perméabilité en grand du milieu,
- de préciser, notamment par des mesures à partir du fond, le rôle hydraulique des failles ou fractures aquifères éventuellement rencontrées,
- de déterminer et suivre dans le temps les propriétés géochimiques des eaux et gaz rencontrés au cours de la foration des galeries et sondages depuis le fond, dans le but de préciser les connexions des zones plus ou moins perméables traversées,
- d'évaluer le tenseur des contraintes initiales,
- d'apprécier à partir des cavités creusées dans le laboratoire souterrain la forabilité de la roche ainsi que son comportement en parois (risque d'écaillage pour les roches dures, convergence pour les roches plastiques)
- de mesurer les effets mécaniques différés (relaxation, fluage),
- de préciser les propriétés géochimiques pouvant intervenir sur la migration des radionucléides et notamment d'affiner la détermination des coefficients d'échange eau-roche mesurés sur carottes.

2.3.1 Approfondir les connaissances sur la formation-hôte et ses encaissants : les campagnes sismiques, forages et essais sur échantillons

• A l'échelle du site du laboratoire, la campagne de sismique 3D de 4 km² en 2000 et les forages carottés EST204 et EST205 dans l'axe de chacun des deux puits ont précisé la géométrie des couches composant le sous-sol du site du laboratoire.



Construction en 3D du modèle géologique

La campagne de sismique 3D a permis d'obtenir une image en volume du site du laboratoire avec un niveau de détail plus grand. Elle a confirmé que la couche argileuse du Callovo-Oxfordien est régulière avec une épaisseur supérieure à 130 m et une géométrie conforme à l'histoire des dépôts qui se sont succédés au Callovo-Oxfordien. Il n'y a donc pas eu de phénomène perturbateur sur la zone du laboratoire depuis la formation du Callovo-Oxfordien (grande stabilité).

Elle n'a mis en évidence aucune faille à jeu vertical dans la couche du Callovo-Oxfordien, ni dans les horizons sus-jacents de l'Oxfordien calcaire. Dans les niveaux inférieurs de la couche sous-jacente du Dogger, des structures subverticales ONO-ESE avec un jeu vertical de faible amplitude (2,50 m au

maximum) ont été détectées sans pouvoir en déterminer la nature exacte (fracturation ou structure géologique particulière) : cette indétermination a été levée dans une étape ultérieure.



3

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le milieu géologique : le site de Meuse/Haute-Manne



Position des forages réalisés par l'Andra sur le secteur et des mesures sismiques

• A l'échelle du secteur, quatre forages à but hydrogéologique et géochimique (EST201, EST202, EST203, EST206) ont été réalisés en 2000 à diverses profondeurs autour de l'emplacement des deux puits et équipés d'instruments de mesure pour y suivre les pressions hydrauliques.

Ils ont permis de déterminer les gradients hydrauliques dans les trois formations surmontant le Callovo-Oxfordien (calcaires du Barrois, marnes du Kimméridgien, Oxfordien) et de préciser leur hydrologie afin d'en définir l'état initial avant d'engager la construction du laboratoire. A partir des tests hydrauliques en forage et des analyses géochimiques effectuées sur les prélèvements d'eau, l'Andra a établi une description fine des niveaux perméables et imperméables sur l'ensemble du site, identifié les niveaux les plus poreux dans l'Oxfordien calcaire, mesuré leur perméabilité et caractérisé leurs relations hydrauliques.

• Le programme extensif d'essais mécaniques mené sur les carottes du forage EST205 a permis d'améliorer les connaissances sur le comportement géomécanique des argilites et d'élaborer des modèles de comportement pour établir des prévisions d'endommagement de la roche selon le type de construction des installations souterraines.

Le forage EST205

Il été réalisé suivant une méthode différente des précédentes, en utilisant une boue à l'huile pour obtenir une stabilité parfaite des parois du forage et une excellente qualité d'échantillons (carottes à but d'études géomécaniques). Ce forage a, de plus, permis, pour la première fois sur le site, d'effectuer des mesures pour connaître l'état initial des pressions de terrains dans les formations géologiques.

Ce programme a été complété par des mesures géomécaniques dans le forage EST204 réalisé dans l'axe du puits principal

• Huit forages de profondeurs différentes sur cinq emplacements répartis sur l'ensemble du secteur (programme FSP) ont permis, en 2003, d'évaluer la charge hydraulique dans l'Oxfordien (EST311, EST313, EST321, EST331, EST351) et dans les niveaux supérieurs du Dogger (EST312, EST322, EST342) sur une large superficie autour du laboratoire.

Les emplacements choisis se situent sur un transect orthogonal à celui des trois forages existant depuis 1996 (HTM102, EST103, MSE101), à plus de 5 km de chacun d'eux, pour mieux caler les modèles.

La perméabilité des formations calcaires a été mesurée dans ces forages pour évaluer les vitesses d'écoulement des eaux. Des prélèvements d'eau ont aussi été réalisés pour analyser certains radionucléides présents naturellement dans ces eaux (krypton 81 et chlore 36) et déterminer depuis combien de temps elles s'étaient infiltrées dans la roche. En outre, les observations géologiques réalisées dans ces forages et des prélèvements de carottes ont permis d'acquérir de nouvelles données, jusqu'à une distance d'une dizaine de kilomètres du site, et de consolider ainsi le modèle géologique.

• En 2003-2004, le programme de reconnaissance de la formation a comporté huit forages (programme FRF) :



Plateforme de forage

- quatre forages déviés (EST209, EST211, EST361 dans le Callovo-Oxfordien, EST210 dans le Dogger) ont confirmé l'homogénéité de la formation-hôte et l'absence de faille. Plus de 1300 m de carottes ont été extraites dans la formation du Callovo-Oxfordien et 300 m dans la formation du Dogger.

Le premier objectif a été de reconnaître la nature des structures repérées en 2000 dans les calcaires du Dogger par la sismique 3D : le forage dévié EST210 dans le Dogger a montré qu'elles ne correspondaient pas à des failles, mais présentaient les caractéristiques géométriques et sédimentologiques de massifs de coraux fossiles observés par ailleurs sur des affleurements régionaux. A leur aplomb, la perméabilité du haut du Dogger, loin d'en être affectée, est au contraire très faible. Les mesures sismiques faites à partir de ce forage pour obtenir une image plus nette du Dogger à cet endroit ont confirmé cette interprétation. Ces travaux permettent donc d'écarter la présence de structures tectoniques dans le Dogger au niveau du site.

Le forage dévié EST211 a carotté la formation du Callovo-Oxfordien sur plus de 400 m au dessus des structures vues dans le Dogger où il n'a repéré aucune discontinuité et peu de microfissures.

Deux autres forages déviés ont suivi les argilites sur une grande longueur dans le Callovo-Oxfordien : le forage EST361, quasiment horizontal, de même direction que les précédents (NO-SE) sur plus de 800 m (dont 650 m carottés) et le forage EST209 de direction orthogonale sur 300 m.







Ces trois derniers forages ont reconnu la formation-hôte sur 1500 m et permis de comparer ses caractéristiques sédimentologiques et pétrophysiques à l'échelle de l'emprise du laboratoire avec les informations de la campagne sismique 3D sur le site. Ils ont montré qu'il n'y avait pas *de fractures et très peu de microfissures dans le Callovo-Oxfordien sur le site du laboratoire et que celles-ci étaient colmatées.* Elles sont, de plus, préférentiellement localisées au toit et au mur de la couche et sont espacées d'une (ou plusieurs) centaine de mètres. Leur extension serait d'ordre métrique. *Des mesures* in situ *ont vérifié la très faible perméabilité de l'argilite.*

Les forages EST361 et EST209 ont aussi servi à des mesures de contraintes *in situ* pour préciser le champ de contraintes naturelles dans le Callovo-Oxfordien.



Carottes d'argilite

3
- quatre forages verticaux ont mesuré des paramètres importants pour la sûreté (EST207, EST208, EST212, EST363).

Compte tenu de la capacité limitée des gaz à se disperser hors des formations analogues peu perméables examinées à l'étranger, l'Andra a cherché à évaluer les conditions de transport des gaz qui pourraient être produits par la dégradation des composants du stockage (principalement l'hydrogène issu de la corrosion des composants métalliques du stockage). Terminés fin 2004, *les essais d'injection de gaz dans le forage EST363* sur la plate-forme de Saudron (540 m) ont permis de déterminer les pressions d'entrée d'air et de fracturation dans les argilites et d'évaluer les conditions d'écoulement eau/gaz, en particulier de préciser à partir de quelle pression le transfert des gaz dans les argilites du Callovo-Oxfordien se fait par écoulement conjoint avec l'eau ou par l'ouverture de fractures dans la roche saine. Dans ce cas, il a été constaté que ces dernières se referment et que la perméabilité de la roche n'est pas modifiée après l'évacuation du gaz.

Achevées en juin 2004, les mesures de pression et l'échantillonnage des fluides à partir du forage EST207 (-560 m) ont permis d'obtenir le profil de pression hydraulique sur toute la hauteur du Callovo-Oxfordien et aux interfaces avec les formations encaissantes.

Ces données ont été complétées par les *mesures de pression en continu* obtenues grâce à des sondes EPG (similaires à celle installée en 1996 dans le forage EST107) placées dans les argilites du Callovo-Oxfordien (forages EST211, EST212 et EST363).

Dans le forage *EST208, l'Andra* a réalisé, à partir de la surface, un essai de diffusion à 500 m de profondeur similaire à ceux conduits à partir des galeries expérimentales souterraines (expérimentation DIR exposée ci-dessous).



Carothèque du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne

2.3.2. Les expérimentations dans le Laboratoire de Meuse Haute-Marne : valider *in situ* les connaissances acquises

Le programme de recherches vise à fournir, en les justifiant, les données nécessaires à la modélisation des phénomènes identifiés comme importants pour la conception et l'évaluation de la sûreté d'un stockage éventuel. Il est regroupé autour de deux thèmes majeurs :

- valider la constructibilité d'un stockage ainsi que la capacité à gérer l'endommagement de la roche induit par le creusement, et à sceller les ouvrages,
- confirmer les propriétés favorables de la formation du Callovo-Oxfordien (composition géochimique, capacité de confinement).



2.3.2.1 Les expérimentations dans les puits (principal et auxiliaire) durant leur creusement

Les travaux renvoyaient à trois objectifs scientifiques.

• Conforter le modèle géologique par l'apport de données sédimentologiques et microstructurales. Durant tout le creusement des puits à partir d'août 2000, les scientifiques ont procédé au relevé continu de toutes les formations traversées et établi une carte géologique détaillée de la paroi sur toute la hauteur des deux puits. Les objectifs de ce suivi géologique étaient d'évaluer la variabilité lithologique des couches à l'échelle décamétrique, d'observer leur nature selon les directions, de caractériser leur fracturation et micro-fracturation naturelle et d'en évaluer l'incidence sur les circulations de fluides. Les observations réalisées depuis le début du creusement des puits confirment les données sédimentaires et tectoniques déjà acquises par les forages et fournissent des données structurales quantifiées précises qui confortent le modèle géologique.

• Préciser les propriétés hydrogéologiques des formations calcaires sus-jacentes au Callovo-Oxfordien. Le suivi hydrogéologique de ces formations porte sur l'observation des éventuelles venues d'eau en paroi et leur mesure grâce des dispositifs de comptage installés dans les puits. Lors du creusement, des forages sont aussi effectués pour prélever des fluides non perturbés et réaliser des tests hydrogéologiques. Les perturbations hydrogéologiques engendrées par le fonçage dans les formations sus-jacentes sont suivies en continu par le réseau de mesures installé au cours de l'année 2000 dans les forages autour des puits.

• Caractériser l'endommagement créé dans le Callovo-Oxfordien par la construction des puits. Le suivi des perturbations mécaniques consiste à observer les parois des puits pour décrire les effets du creusement et du déconfinement naturel des formations traversées et à quantifier la déformation par des mesures sur toute la hauteur des puits dès leur creusement et jusqu'à la pose du revêtement en béton (après trois semaines environ).



Evaluation de la zone endommagée par mesures sismiques

Dans les argilites du Callovo-Oxfordien, l'Andra a aussi mesuré les déformations et déplacements dans la roche ainsi que les contraintes (et/ou déformations) dans le revêtement des puits pour appréhender le comportement différé du massif et du revêtement. Grâce à des forages radiaux, des mesures sismiques et des mesures de perméabilité ont été faites pour caractériser les perturbations de la zone affectée par le creusement des puits. Toutes ces mesures de déformation pourront se poursuivre durant plusieurs années.



Géologues examinant la paroi d'une galerie

A ces suivis sont associés des échantillonnages systématiques en parois pour analyses en laboratoires extérieurs (pétrographie, minéralogie, hydrogéochimie, géomécanique), ou pour conservation de témoins, ainsi que des mesures topographiques et des prises photographiques. Toutes les données sont intégrées en temps réel dans la base de données de l'Andra.

Le programme international de modélisation associé à l'expérimentation REP

Le programme Modex-REP (V^e puis VI^e programme cadre européen de recherche et développement -PCRD) réunit des organismes européens (belge, allemand, espagnol, suisse) homologues de l'Andra et des partenaires de recherche français et européens. L'objectif est de tester la capacité des modèles rhéologiques à prédire la réponse de l'argilite au creusement du puits.

Démarrée au 2^e trimestre 2005, l'expérimentation REP fournit des observations de l'endommagement des argilites en paroi d'un puits et une première vérification à grande échelle des modèles de simulation du comportement mécanique des argilites.

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le milieu géologique : le site de Meuse/Haute-Manne

Une quinzaine de forages réalisés à partir de la galerie expérimentale située à -445 m (45 m au-dessus des galeries du niveau principal du laboratoire souterrain) sont dirigés vers une section du puits principal située 20 m plus bas (entre -465 et -470 m) et orientés dans des directions choisies selon les pressions de terrain autour du puits et à des distances différentes de l'axe du puits. Après la reprise du creusement du puits principal en mars 2005 (arrêté durant la réalisation de la galerie à -445 m à partir d'août 2004), les capteurs placés préalablement dans ces forages suivent en temps réel l'approche et le passage du front de creusement, puis les effets différés sur les argilites. Ils mesurent les variations de déformation, de pression, de perméabilité et de vitesse sismique par méthode géophysique et permettent de caractériser finement le comportement géomécanique du Callovo-Oxfordien.

2.3.2.2 Les expérimentations dans les galeries du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne



Galerie expérimentale (- 445 mètres) du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne

Les galeries du laboratoire de Meuse/Haute-Marne accueillent depuis 2004 au niveau -445 m (à partir du puits principal) et depuis le deuxième trimestre 2005 au niveau -490 m (à partir du puits auxiliaire) des expérimentations pour valider *in situ* les connaissances résultant de tests au Mont Terri ou en laboratoires de surface. Ces expérimentations portent principalement sur le suivi de l'endommagement mécanique de la roche durant son creusement, les données géochimiques, les mesures de diffusion de l'eau et de radionucléides grâce à des traceurs.

La galerie expérimentale à - 445 m

Opérationnelle en novembre 2004, cette galerie située dans le puits principal à -445 m accueille, outre le dispositif de l'expérimentation REP qui mesure les déformations dans l'argilite du puits principal pendant le fonçage de celui-ci, un important programme expérimental géomécanique, hydrogéologique et géochimique (expérimentations PEP, PAC, DIR, SMC).

Les expérimentations réalisées dans cette galerie visent à *acquérir in situ des données sur l'endommagement de l'argilite lors de son creusement ainsi que sur les transferts et interactions fluides/roches dans les argilites du Callovo-Oxfordien :*

 - des forages obliques ont été réalisés à l'intersection entre le puits et le toit de la galerie. Des mesures de vitesses d'ondes ont été effectuées avant et après creusement. Elles ont montré que l'endommagement était limité à une épaisseur de quelques dizaines de centimètres (20 à 40 cm) en paroi où l'argilite est microfissurée, mais pas fracturée,

77

- pendant le creusement, un extensomètre a été installé dans l'axe de la galerie afin de suivre les déformations. Une section de mesures (SMC) transversale à la galerie expérimentale a été mise en place après creusement : des capteurs de force et de déformation ont été posés sur le soutènement et des capteurs de déformation dans l'argilite. Des forages en paroi de la galerie dans différentes directions ont été injectés de résine, puis surcarottés pour visualiser, par une technique de fluorescence, les fractures qui auraient été induites par le creusement. Aucune fracture n'a été détectée,
- deux forages ont été équipés pour prélever de l'eau et des gaz dissous dans l'argilite (expérimentation PAC) afin de mesurer in situ certains paramètres chimiques et préciser la composition chimique des eaux interstitielles. L'objectif est d'analyser les composants chimiques qui conditionnent la rétention des radionucléides dans la formation. Le matériel mis au point et testé au Mont Terri a été utilisé.



Deux forages horizontaux ont été équipés (expérimentation PEP) pour compléter les données de perméabilité des argilites, ainsi qu'un forage vertical (associé à l'expérimentation REP). Les données acquises ont confirmé les très faibles perméabilités de la roche déjà mesurées.



Relevé de données dans la galerie expérimentale à - 445 m

Trois forages ont été équipés pour réaliser l'expérimentation DIR qui confronte les résultats d'expériences de diffusion in situ avec les résultats de modélisations numériques construites à partir de travaux sur échantillons carottés utilisant les mêmes traceurs. L'objectif de DIR est de mesurer la vitesse de diffusion de l'eau (molécules comportant du tritium) et de certains éléments radioactifs très présents dans les déchets ou de comportement similaires, mais sous une forme moins radioactive et à vie courte (iode 125, chlore 36, sodium 22, césium 134). Cette expérience permet d'obtenir des résultats dans des délais relativement courts : le suivi en continu de la concentration des éléments dans la chambre d'injection, permet en effet de calculer les paramètres de diffusion en interprétant la décroissance de la concentration en traceurs de la solution injectée. A terme, un carottage de la zone de terrain où les traceurs auront diffusé pourra être réalisé.

Les galeries expérimentales à - 490 m

Le creusement des premières galeries expérimentales au niveau principal (-490 m) à partir de la base du puits auxiliaire a commencé fin 2004. Plusieurs expérimentations y sont ou seront menées d'ici fin 2005.

- la caractérisation de l'endommagement se poursuit dans des galeries expérimentales instrumentées (SMR), avec des mesures géotechniques et l'acquisition de données similaires à celles réalisées dans la galerie à -445 m : on peut ainsi comparer le comportement de deux horizons d'argilites aux caractéristiques mécaniques légèrement différentes (argilites riches en carbonates et plus dures au niveau -445 m qu'au niveau -490 m),
- adaptée de l'essai EZ-A mené à Mont Terri entre 2003 et 2004, *l'expérimentation KEY* vise à réaliser et tester une saignée pour interrompre la zone endommagée. Réalisées autour d'une galerie avec une scie construite à cet effet, des saignées de 2,7 m de profondeur sont emplies de briques de bentonite (argile gonflante) compactée de façon à interrompre la zone fracturée. Une dizaine de forages d'instrumentation servent à observer le comportement de l'argilite pendant la construction et à mesurer les performances obtenues,
- *la mesure de la conductivité thermique, expérimentation TER*, nécessite d'installer un dispositif de chauffage en forage (du même type que celui testé au Mont Terri) et des capteurs de température autour,
- la mesure du fluage de l'argilite sur plusieurs années est réalisée dans des forages à partir d'une galerie, au moyen d'appareils (en particulier dilatomètres) qui contrôlent la pression en paroi du forage et la déformation (expérimentation GIS),
- *les expérimentations PAC et DIR*, déjà réalisées à -445 m, sont répétées dans une galerie expérimentale au niveau 490 m pour compléter les mesures.

DIR Diffusion et rétention : une méthode d'essai éprouvée

Déjà utilisée à Mont Terri, la méthode consiste à maintenir au contact de l'argilite une solution contenant un mélange de traceurs dans une chambre d'injection au fond d'un forage. A intervalles rapprochés, on prélève des échantillons de cette solution, on les analyse en laboratoire et, à partir de l'observation de la décroissance de la concentration de traceurs dans la solution, on calcule le coefficient (ou vitesse) de diffusion du traceur presque en temps réel. Après un à deux ans, des prélèvements dans la roche autour du forage d'essai permettront d'analyser encore plus finement les profils de concentration des traceurs dans la roche.

Les expérimentations sont mises en place à mesure du creusement des galeries expérimentales au cours des trois premiers trimestres de l'année 2005. Des premières données ont été acquises sur le comportement mécanique et l'endommagement de la roche au cours des premier et deuxième trimestres 2005. L'essai technologique KEY est prévu courant 2005. L'obtention de résultats pour les expérimentations PEP et GIS est prévue au cours des troisième et quatrième trimestres et se poursuivra au-delà, de même que les expérimentations PAC et DIR qui permettront d'obtenir des données en continu après leur mise en place au troisième trimestre 2005. L'essai TER fournira fin 2005 de premières données. Les nouvelles données figureront dans une version actualisée de ce rapport fin 2005. De plus, les expériences resteront à demeure et poursuivront l'acquisition de données sur le moyen terme au-delà de 2005.



Expérimentation PAC

Observation interdisciplinaire de l'EDZ : une coopération scientifique dans le laboratoire souterrain

Une galerie du laboratoire souterrain sera dévolue à « l'Observatoire Interdisciplinaire sur l'EDZ », programme de recherche du CNRS (Groupement de Recherche FORPRO) sur plusieurs années. Il regroupe des expérimentations relatives aux effets de la désaturation sur le comportement mécanique des argilites ainsi que l'observation des processus mécaniques et physico-chimiques (développement de la microfissuration, évolution de la structure et de la chimie des argilites).

Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne : les grandes étapes de la construction

Phase de construction	Date de réalisation
Début du creusement du puits principal	août 2000
Début du creusement du puits auxiliaire	novembre 2000
Arrêt suite à un accident grave	mai 2002 - avril 2003
Arrivée du puits principal dans le Callovo-Oxfordien à -420 mètres	mai 2004
Arrivée du puits auxiliaire à -490 mètres	octobre 2004
Mise en service d'une galerie d'expérimentation dans le puits principal (-445 mètres)	novembre 2004
Reprise du creusement du puits principal	mars 2005
Creusement des galeries expérimentales à la base du puits auxiliaire	à partir de février 2005

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le milieu géologique : le site de Meuse/Haute-Marne

Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne : les grandes expériences

	Expériences	Nature des travaux scientifiques	Chronologie	
Creusement des puits	Observations géologiques	Description des couches traversées : levé des fractures et objets géologiques rencontrés	Observations réalisées tout au long du creusement depuis août 2000	
	Mesures débits d'exhaure dans les puits	Collecte des venues d'eau en paroi des puits au droit de chaque niveau producteur de l'Oxfordien et mesure des débits	Mesures réalisées dans les calcaires Oxfordiens depuis février 2002	
	Mesures géotechniques	Mesures de déformation en parois de puits et dans l'argilite, caractérisation de l'EDZ sur 4 zones instrumentées (SMGR) entre - 450 et - 500 m	Mesures réalisées à intervalles réguliers, tout au long du creusement depuis août 2001 et jusqu'au 1 ^{er} semestre 2005	
	REP (REPonse de la roche au creusement du puits)	Puits Instrumentation d'un volume de roche traversée par le puits principal pour mesurer l'état de la roche avant creusement, puis les perturbations pendant et après	Instrumentation mise en place fin 2004 - début 2005, suivi du creusement et des effets différés en continu depuis le 2° trimestre 2005	
Galerie - 445 mètres	Mesures géotechniques	Mesures de déformation (SMC) des parois de la galerie et dans l'argilite, caractérisation de l'EDZ	Mesures réalisées pendant le creusement (4° trimestre 2004) et suivi depuis lors	
	PEP (PErméabilité et Pression)	Mesures de confirmation de la perméabilité des argilites et mesures complémentaires de charge hydraulique	Mesures réalisées au 1ª trimestre 2005	
	PAC (Prélèvement pour Analyse Chimique)	Analyses géochimiques et mesure de pression partielle de gaz (pCO2) pour l'obtention des composants de la chimie de l'eau de l'argilite	Instrumentations installées fin 2004 - début 2005 Prélèvements réguliers depuis pour analyses chimiques et suivi des traceurs	
	DIR (DIffusion et Rétention)	Mesure de diffusion (différents traceurs) dans l'argilite		
Galeries - 490 mètres	Mesures géotechniques	ldem galerie à - 445 m	Mesures réalisées pendant le creusement (1 ^{er} semestre 2005) et suivi au-delà	
	KEY	Test, en vraie grandeur, de la réalisation de saignées d'interruption de la zone endommagée, de leur remplissage avec de l'argile gonflante, puis mesure de performances	Essai technologique mi- 2005 et suivi des performances au-delà	
	PEP	ldem galerie à - 445 m	Installation de l'instrumentation et mesures au 3 ^e trimestre 2005	
	PAC	ldem galerie à - 445 m	Installation des instrumentations au 3° trimestre 2005 et suivi	
	DIR	ldem galerie à - 445 m	en continu	
	GIS (Géomécanique In Situ)	Mesures de fluage avec dilatomètre	Installation de l'instrumentation au 3° trimestre 2005 et suivi en continu	
	TER	Mesure de la conductivité thermique de l'argilite	Installation de l'instrumentation au 3º trimestre 2005 et suivi en continu	

81

3. Les connaissances acquises

3.1 Un environnement géologique bien compris

3.1.1 Des couches de géométrie simple et régulière

L'examen détaillé de 350 km de profils géophysiques sismiques sur le secteur d'étude montre que les déformations tectoniques qui ont affecté la région depuis 150 millions d'années sont faibles et 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, ce qui facilite la conception d'une architecture de stockage.

3.1.2 Un environnement géologique stable

La France appartient au domaine dit « de la plaque ouest-européenne ». C'est la remontée de l'Afrique vers le nord, amorcée il y a près de 100 millions d'années, et sa collision avec l'Eurasie depuis 50 millions d'années qui a provoqué la formation des Alpes. La vitesse de convergence de ces plaques est très faible. Elle est estimée inférieure à 1 cm par an. Ce mouvement est absorbé pour l'essentiel par les déformations qui se produisent dans les chaînes montagneuses. Le reste du mouvement est absorbé par des glissements le long des grandes failles qui découpent la plaque. En Europe de l'ouest, c'est le cas de la zone dite « *du rift ouest-européen* » qui correspond à des fossés sédimentaires comme l'Alsace, caractérisée par une sismicité notable et par des déformations reconnues d'origine tectonique. Les glissements sur les failles les plus actives sont de l'ordre de 0,01 à 0,1 mm/an dans le fossé du Rhin. Hors de ces zones, les mouvements possibles sont encore plus faibles et se répartissent entre les failles régionales qui affectent le socle. Les valeurs possibles de glissement sont de l'ordre de 0,001 à 0,0001 mm/an.



Sismicité du Bassin Parisien et des zones voisines

Situé dans ce contexte intra-plaque, à l'écart des régions tectoniquement actives, le bassin de Paris est resté particulièrement peu affecté par la tectonique au cours des derniers 65 millions d'années. C'est une zone remarquable de la plaque ouest européenne, où la lithosphère présente une épaisseur uniforme stable et qui se distingue par son caractère pratiquement asismique.

Le site de Meuse/Haute-Marne a donc conservé un environnement géologique stable : le lent déplacement des plaques qui constituent la croûte terrestre et la situation de cette partie du bassin de Paris à plus de 350 km du front de collision alpin expliquent qu'elle soit restée peu déformée.

Les données de sismicité disponibles confirment que la région est remarquablement peu sismogène. Un réseau de stations d'enregistrement des secousses sismiques a été installé dans un rayon de 30 km autour du laboratoire souterrain et complète les réseaux d'écoute nationaux déjà mis en place. Il a enregistré les récents séismes de Saint-Dié et de Besançon, mettant en évidence leur très faible effet sur le secteur, de même que des séismes jusqu'à 10 000 fois plus faibles ou des séismes très éloignés comme celui de Sumatra en décembre 2004 ainsi que l'ensemble des mouvements liés aux activités anthropiques locales comme les tirs de carrière.

Cependant, on ne peut totalement exclure le risque d'un séisme proche du site à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années. Pour estimer l'aléa sismique pertinent sur de très longues durées, on fait l'hypothèse que les failles proches du site sont actives et on considère les valeurs des *séismes maximums physiquement possibles (SMPP)*, malgré l'absence de sismicité et de déformations tectoniques récentes. On fait donc l'hypothèse, très pénalisante, d'un séisme hypothétique de magnitude 6,1±0,4 supposé se produire à 6 km du site. *Par précaution, on vérifie que les ouvrages d'un stockage résistent à un séisme d'une telle intensité.*

3.1.3 Une absence de ressources naturelles exploitables

Des recherches ont été menées entre 1903 et 1945 pour le charbon, entre 1978 et 1988 pour les hydrocarbures. D'après les gisements connus en Lorraine, deux niveaux du Permien étaient susceptibles d'offrir une ressource : le Westphalien, principale roche-mère des hydrocarbures et formation la plus riche en charbon dans le bassin lorrain, est absent à l'aplomb du site et le Stéphanien, qui dispose d'un très faible potentiel en charbon, se situe à grande profondeur (3 800 m) d'après les profils sismiques et les forages.

Quant à une ressource géothermique possible, les données des forages pétroliers et des forages réalisés par l'Andra montrent que sur le secteur étudié :

- le gradient géothermique mesuré (2,6 °C pour 100 m de profondeur qui s'ajoutent à la température moyenne à la surface du sol de 10 °C) est plutôt inférieur à la moyenne, d'où une température dans les grès aquifères du Trias inférieur relativement basse à 1300 m de profondeur (au plus égale à 45 °C),
- la productivité en eau des grès triasiques est faible ou même douteuse.

Il n'existe donc pas de ressource naturelle exceptionnelle sur le secteur étudié.

RFS III.2.f. « Absence de stérilisation de ressources souterraines. Au plan de la gestion du sous-sol, le site devra être choisi de façon à éviter des zones dont l'intérêt connu ou soupçonné présente un caractère exceptionnel ».

3.2 Les propriétés favorables de la couche argileuse

3.2.1 Une couche argileuse homogène sur une grande surface

Les argilites du Callovo-Oxfordien forment une couche à dominante argileuse homogène entre 422 et 552 m de profondeur à l'aplomb du laboratoire souterrain. Avec le pendage des couches vers le nord-ouest, cette profondeur augmente progressivement pour atteindre plus de 600 m à une quinzaine de kilomètres vers le nord. Parallèlement, l'épaisseur de la couche varie de 130 à 160 m environ du sud vers le nord-ouest. L'épaisseur de la couche est un gage de bon confinement (plus la couche est épaisse, plus elle apporte une protection importante). Les données de géophysique sismique et les corrélations entre forages montrent que

cette variation de l'épaisseur est progressive à l'échelle du secteur et cohérente avec la topographie initiale, peu contrastée, qui a déterminé la sédimentation de cette formation.

L'homogénéité de la couche a été appréhendée à plusieurs échelles : du secteur à l'échantillon et dans les directions horizontales et verticales.



La variation du niveau marin au moment du dépôt se traduit par des variations des couches sédimentaires : plus le niveau de la mer est haut (on parle du maximum d'inondation), plus les dépôts d'argile dominent ; plus il est bas, plus les carbonates dominent.

• Verticalement, les mesures montrent toujours les mêmes *faibles variations de la composition minéralogique* (teneur et type d'argiles, de carbonates, de quartz et de pyrite) de la roche : ceci atteste que les sédiments se sont déposés au même moment (il y a environ 155 millions d'années), dans un même type d'environnement et avec la même intensité. Les petites variations des proportions des phases minéralogiques principales (argiles, carbonates, quartz et feldspaths) s'organisent en trois niveaux sédimentaires continus (ou séquences). Elles sont l'expression de faibles variations cycliques du niveau marin au moment du dépôt de la couche (entre -158 millions et -152 millions d'années environ). Les épaisseurs de ces trois séquences sont respectivement de 18 m (séquence inférieure), 80 m (séquence médiane) et 34 m (séquence supérieure) à l'aplomb du laboratoire souterrain. C'est dans la séquence médiane, approximativement au centre de la couche et au niveau d'implantation étudié pour un éventuel stockage (-490 m à l'aplomb du laboratoire), que se trouve la plus grande proportion de minéraux argileux (jusqu'à 60%). Au sein de cette séquence, le changement de la minéralogie des argiles sur quelques mètres traduit un déplacement des sources d'apport des sédiments en liaison avec les conditions de haut niveau marin régnant lors du dépôt. La séquence supérieure montre une teneur en carbonates plus élevée. Ceux-ci s'expriment sous forme de nodules et de petits niveaux carbonatés décimétriques à métriques

Composition moyenne des trois séquences de la couche d'argilites⁶

	Séquence supérieure	Séquence médiane	Séquence inférieure
Carbonates	42 %	23 %	28 %
Argiles	25 %	55 %	41%
Quartz et feldspaths	31%	20 %	29 %

6 On donne les trois constituants majeurs. Il existe par ailleurs, une faible part (2 à 3 %) de pyrite et de matières organiques.



Diagraphies montrant l'homogénéité latérale du Callovo-Oxfordien sur le secteur de Meuse/Haute-Marne

• Latéralement, cette couche argileuse présente globalement la même organisation sur une zone de plus de 350 km² dans le secteur étudié : elle apparaît pratiquement identique dans tous les forages dans un rayon de 15 km autour du laboratoire souterrain, d'après les mesures réalisées en continu dans ces forages (diagraphies) et l'analyse des minéraux la constituant. En particulier, les mesures diagraphiques permettent de corréler sur des distances de 20 à 30 km les différents niveaux du Callovo-Oxfordien identifiés grâce à une analyse sédimentologique et stratigraphique fine. Ainsi, la seule tendance nette mise en évidence est un très léger enrichissement en quartz (5 à 10%) lorsque l'on se déplace d'une quinzaine de kilomètres vers le nord à partir du site du laboratoire. Il en est de même pour les variations d'épaisseur de chacune des séquences, qui sont très progressives (quelques mètres). Seule la séquence inférieure, contrôlée par la topographie de la formation sous-jacente, montre des variations d'épaisseur plus sensibles (de l'ordre d'une vingtaine de mètres dans le secteur considéré). La constance de ces séquences témoigne du contexte tectonique et sédimentaire calme qui caractérise la période de dépôt. Cela constitue un critère favorable qui donne une certaine latitude pour le positionnement d'un éventuel stockage.

L'alimentation du Callovo-Oxfordien en sédiments s'est, de fait, produite de façon continue et dans des conditions de dépôt calmes. La reconstitution des conditions de dépôt de la formation montre par ailleurs que l'origine des sédiments n'a pas significativement changé pendant toute la durée de dépôt (démantèlement du massif du Brabant et du massif Armoricain émergés à cette époque) et que la sédimentation s'est faite à distance des côtes dans des conditions uniformes sur l'ensemble de la zone.

Ce contexte exclut :

- la présence de lacunes de sédimentation d'une ampleur susceptible de perturber la continuité de la couche,
- l'existence de lentilles sableuses au sein de la couche, étant donné, en particulier, l'éloignement des sources d'apport (zones exondées), notamment en période de haut niveau marin.

Ainsi, les reconstitutions géologiques et les observations en forage n'ont pas mis en évidence de discontinuité sédimentaire notable susceptible de modifier, sur le secteur étudié, les propriétés géochimiques et géomécaniques des argilites, donc leur capacité de rétention ou leur aptitude au creusement d'ouvrages souterrains. • Au niveau de l'échantillon, les analyses pour déterminer la distribution de fossiles moléculaires (molécules organiques typiques d'organismes vivants présents lors de la sédimentation du Callovo-Oxfordien) montrent une faible variabilité (horizontale et verticale) qui atteste, là encore, un milieu de dépôt et un paléoenvironnement très stables au cours de cette période sur la zone étudiée.

3.2.2 L'absence de faille

Des failles et des fissures pourraient affecter la continuité du Callovo-Oxfordien, donc sa *capacité de confinement*. Il convient donc de détecter ce type de discontinuité, d'en connaître l'origine et les évolutions au cours des temps, notamment en interprétant l'histoire géologique et tectonique de l'est du bassin de Paris en référence avec des événements tels que l'ouverture de la mer du nord (il y a 170 millions d'années) et du golfe de Gascogne (130 millions d'années), les soulèvements des Pyrénées (50 millions d'années) et des Alpes (30 millions d'années). Depuis ce dernier épisode tectonique, l'orientation des contraintes régionales est restée stable.

Aucune faille n'a été, jusqu'à présent, mise en évidence dans la formation du Callovo-Oxfordien et ses encaissants sur une zone de 250 km² au nord et au nord-ouest du laboratoire. Les seules failles connues sont situées hors de cette zone : failles de la Marne (de direction N-NO) et fossé de Gondrecourt (de direction N-E) qui constituent les limites ouest, sud et est du secteur étudié.

Les travaux de cartographie géologique et la campagne de sismique réflexion permettent d'écarter la présence de failles à rejet vertical supérieur à quelques mètres (seuil de détection de 2 m avec les techniques de traitement fin de la sismique 3D). Des failles plus petites, dites secondaires, si elles existent, ont une extension limitée (quelques centaines de mètres d'extension maximum).



Exemple de section sismique 3D interprétée

Les travaux de reconnaissance par forages déviés ont complété les investigations précédentes et recherché une éventuelle fracturation secondaire :

- dans le Callovo-Oxfordien, aucun des forages réalisés par l'Andra, aussi bien verticaux que dirigés obliques (soit une longueur cumulée de formation carottée de 2500 m), n'a traversé de faille secondaire. Quelques microstructures ont été rencontrées. Elles sont toutes colmatées et ne modifient pas les propriétés de confinement du Callovo-Oxfordien. Les mesures de perméabilité réalisées dans les forages inclinés au droit de ces microstructures ne montrent pas de variation par rapport aux autres mesures enregistrées dans le Callovo-Oxfordien, ce qui indique qu'elles ne jouent aucun rôle hydraulique particulier. Par ailleurs, le contenu minéralogique des remplissages (par exemple cristaux de célestine) indique qu'elles se sont formées très peu de temps après le dépôt de la couche sous l'effet de la compaction des sédiments et qu'elles n'ont pas ensuite été affectées par des circulations de fluides ;

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le milieu géologique : le site de Meuse/Haute-Marne

- dans les niveaux inférieurs de la couche sous-jacente (Dogger), un forage dévié a traversé la zone où la sismique 3D avait détecté des structures subverticales de direction ONO-ESE. Les observations et tests en forages ont montré qu'il ne s'agissait pas de failles. L'image géophysique très détaillée met en évidence une structure de même taille que celle des récifs de coraux de même niveau stratigraphique, observés à l'affleurement. Parallèlement, l'observation des carottes prélevées dans ce forage montre des faciès récifaux caractéristiques. Enfin, les mesures réalisées indiquent que cette zone présente une très faible perméabilité.

Structures géologiques

En termes géologiques, on distingue plusieurs structures pouvant affecter une formation, selon son origine et la présence ou non d'un déplacement.

Structures avec déplacement

Faille : cassure avec déplacement relatif (rejet) des deux compartiments créés. En pratique, une faille est un accident vertical ou très redressé. Ses dimensions sont variables, de quelques centaines de mètres à plusieurs centaines de kilomètres en horizontal, de quelques dizaines de mètres à plusieurs milliers de mètres en vertical. L'origine d'une faille est toujours tectonique.

Faille secondaire : la notion de « faille secondaire » est relative à la dimension de l'objet, plus petit qu'une « faille majeure » ou « une faille régionale ». S'y ajoute la notion de faible rejet vertical (décimétrique à métrique). Les pétroliers emploient le terme de « faille sub-sismique » pour des failles dont le rejet vertical est trop faible pour être détecté par la sismique réflexion.

Structures sans déplacement

Diaclase : cassure de la roche créée par relaxation de contraintes, a priori d'origine tectonique, sans déplacement des deux parties séparées (ses deux compartiments sont jointifs). Une diaclase a une extension décimétrique à hectométrique.

Joint : toute surface de discontinuité plane (ou sub-plane) sans déplacement relatif des compartiments, mais les deux limites ne sont pas forcément jointives ; les vides ainsi créés peuvent être remplis par des minéraux (carbonates, argiles, quartz, etc.). Un joint peut être d'origine tectonique ou sédimentaire.

Fente de tension : cassure longue de quelques centimètres à quelques décimètres et large de quelques millimètres à quelques centimètres produite par une contrainte.

Microfissure : toute cassure de la roche, sans préjuger de sa genèse, dont l'épaisseur est millimétrique et l'extension maximale décimétrique.

Microstructures : lorsqu'il n'est pas possible d'évaluer l'extension de l'objet (carotte de forage par exemple) et donc d'en déterminer le mode de genèse, on regroupe souvent les diaclases, les joints et les fentes sous le terme de « microstructures ».

3.2.3 Une argile très peu perméable à forte capacité de confinement

La formation géologique du Callovo-Oxfordien a une *perméabilité très faible, ce qui limite à l'extrême les circulations d'eau à travers la couche et s'oppose au transport éventuel des radionucléides par convection,* c'est-à-dire entraînés par l'eau en mouvement.

Les mesures en forage et sur échantillons ont révélé une perméabilité de la couche qui varie de 10⁻¹² à 10⁻¹⁴m/s, l'essentiel des mesures étant concentré entre 5.10⁻¹³ et 5.10⁻¹⁴m/s. Des évaluations indirectes de la perméabilité aboutissent à la même gamme de valeurs. *Cette très faible perméabilité s'explique par la nature argileuse, la finesse et le très petit diamètre des pores de la roche (0,05 microns en moyenne). Les mesures de perméabilité sont comparables qu'elles soient obtenues sur des échantillons d'échelle pluricentimétrique ou en forage à l'échelle décamétrique. Ceci tend fortement à confirmer l'homogénéité de la couche et la constance de ses propriétés.*

Les études ont mis en évidence que la diagenèse s'est produite très tôt pendant la compaction par enfouissement et qu'elle a été très modérée (la température de l'argilite n'a pas dépassé 40 °C, alors qu'elle est de 23 °C actuellement). Les caractéristiques actuelles de la formation du Callovo-Oxfordien ont été acquises pour l'essentiel durant les premiers millions d'années de l'histoire de la couche. Les phases initiales, et notamment les minéraux argileux, n'ont pas été affectées par des modifications majeures de leur cristallochimie et de leur texture. Les analyses isotopiques menées sur la phase carbonatée (notamment à partir des isotopes du strontium et du carbone) montrent clairement que les processus de diagenèse limités ont permis de conserver la signature marine originelle des ciments carbonatés. D'une manière générale, les phénomènes de diagenèse enregistrés par le Callovo-Oxfordien sont très discrets, d'extension régionale et cohérents avec des températures géologiques n'ayant pas excédé 40 °C. Ils ne sont donc pas susceptibles d'être la cause d'hétérogénéités à l'échelle de la zone de transposition.



Analyse par spectrométrie de masse des hopanes (composés organiques dérivant des bactéries) montrant la préservation dans les argilites du Callovo-Oxfordien de structures typiques des organismes vivants (configuration biologique, point rouges) qui traduit une diagenèse thermique modérée.

L'analyse de la répartition de certains éléments chimiques et de leurs isotopes dans les différents minéraux de la roche et dans l'eau interstitielle confirme que les échanges sont restés très limités dans la couche depuis 150 millions d'années. La distribution des éléments les plus mobiles comme le chlore ou l'hélium montre qu'ils se déplacent par diffusion du Dogger vers les calcaires de l'Oxfordien en traversant le Callovo-Oxfordien, et non par convection. *Elle confirme que le transport des éléments chimiques se fait très lentement (plusieurs centaines de milliers d'années pour traverser la couche)*, ce qui est vérifié par des essais de diffusion sur échantillons. Les expériences de diffusion en cours dans le laboratoire souterrain visent à corroborer ce point *in situ*.







Outre sa perméabilité, les capacités de confinement du Callovo-Oxfordien tiennent à sa composition minéralogique : les diagrammes de rayon X et les analyses chimiques montrent que les minéraux argileux les plus abondants sont de type « interstratifiés illite-smectite » qui ont la particularité, surtout la smectite, d'être constitués d'empilements de feuillets (comme un millefeuilles) entre lesquels *les éléments en solution dans l'eau, notamment des radionucléides, peuvent se fixer en grande quantité*. Cette capacité de fixation a été mesurée en laboratoire en mettant en contact des morceaux d'argilites avec une eau dans laquelle était dissous un radionucléide. Les principaux radionucléides étudiés, également toxiques d'un point de vue chimique pour certains, sont l'iode, le technétium, le césium, le sélénium, le bore, le chrome, le nickel, le zirconium, le niobium, le molybdène, l'étain, le plomb, l'uranium, le neptunium et le plutonium. *Cette capacité de fixation se traduit par un retard supplémentaire à la migration des éléments dans le Callovo-Oxfordien et a été testée dans de nombreuses de configurations expérimentales (chimie de l'eau, teneur de l'élément en solution).*

Enfin la composition chimique de l'eau interstitielle de la roche (eau présente en faible quantité et piégée dans les pores de la roche) apparaît en équilibre avec la roche d'après les analyses chimiques et les modélisations effectuées. La détermination de la composition des eaux porales du Callovo-Oxfordien présente des difficultés inhérentes aux propriétés de la roche (faible teneur en eau de la formation, 7 à 8 % en pondéral, très faible perméabilité) et a nécessité de répéter les expériences suivant différents protocoles pour affiner la connaissance. Les éléments acquis permettent d'avoir une fourchette de valeur resserrée et de disposer d'un modèle pour la composition des eaux porales. Celle-ci a été déterminée à partir d'analyses sur échantillons et de modélisations géochimiques. Elle est considérée homogène sur toute l'épaisseur de la formation, en cohérence avec l'homogénéité lithologique globale de celle-ci. Les compositions des eaux ainsi évaluées montrent un pH neutre (légèrement supérieur à 7). Elles sont réductrices comme le confirme la présence de pyrite et de matière organique. Chimiquement, ces eaux présentent un caractère calco-sodique carbonaté. Ce modèle de composition a par ailleurs été validé dans le cadre des travaux menés sur l'argile à Opalinus au Mont Terri par comparaison entre mesures *in situ* et modélisation.

Dans ces conditions chimiques, de nombreux radionucléides comme ceux de la famille de l'uranium (les actinides) présentent une très faible solubilité dans l'eau, et précipitent sous forme solide (et microscopique) ce qui s'oppose à leur transfert dans la roche.

3.2.4 Une couche apte au creusement minier

Les essais et mesures géomécaniques sur les échantillons recueillis en forages ont montré que les argilites sont raides, se déforment peu et de manière très lente, ce qui permet d'envisager un creusement par des méthodes minières classiques.

La composition minéralogique et la compacité des argilites du Callovo-Oxfordien leur confèrent une résistance relativement élevée pour une roche argileuse. Leur résistance à une compression uniaxiale est supérieure à 25 MPa en moyenne dans les niveaux carbonatés et elle est d'environ 20 MPa en moyenne dans les niveaux argileux au milieu de la formation.

L'étude du comportement mécanique des argilites a fait appel à différents types d'essais de chargement triaxiaux faisant varier les contraintes appliquées et le temps d'application. Il ressort de ces essais que *les argilites sont peu déformables*. A titre de comparaison, leurs caractéristiques mécaniques sont équivalentes à celles de la formation argileuse traversée par le tunnel autoroutier de la Chamoise (Savoie) à une profondeur d'environ 400 m.



Opérations de creusement dans le Laboratoire de recherche de Meuse/Haute-Marne

La résistance mécanique de la roche (comparée à la pression des terrains à 500 m de profondeur, soit 12 MPa environ) et sa faible déformabilité permettent le creusement des galeries selon des méthodes courantes. Comme le montre la construction du laboratoire de Meuse/Haute-Marne, on peut utiliser des engins mécaniques pour creuser les galeries, brise roche hydraulique par exemple, ou une méthode à l'explosif (méthode classique de foration-tir). D'autres méthodes minières classiques (abattage par machine à attaque ponctuelle) peuvent aussi être envisagées. Le soutènement des galeries peut, quant à lui, être assuré par des cintres métalliques coulissants ou un boulonnage posé à l'avancement du creusement.

3.2.5 Des caractéristiques compatibles avec la réversibilité du stockage

Si les argilites du Callovo-Oxfordien se déforment peu, elles ont toutefois la capacité d'évoluer légèrement dans le temps, du fait des minéraux argileux qu'elles contiennent (on parle de fluage). Soumises à un état de contraintes anisotrope, les argilites se déforment progressivement et tendent à le rendre isotrope. *Ce mécanisme de comportement différé est lent*. Sa caractérisation a nécessité des mesures longues et très précises sur échantillons, en contrôlant les conditions d'essai pendant plusieurs mois à plusieurs années pour certains échantillons. Les vitesses de fluage mesurées après trois ans correspondent au mieux à des déplacements de quelques microns par an (à la limite de détection des appareillages de mesure actuels). Par compraison, la vitesse de fluage mesurée est 1000 fois plus faible que celle de l'argile de Boom étudiée en Belgique dans le laboratoire souterrain de Mol.

À l'échelle d'un ouvrage, les résultats obtenus pour les argilites indiquent une convergence (déplacement des parois) d'environ 8 à 9 mm après deux ou trois ans et d'environ 15 mm après 20 ans pour une galerie de 6 m de diamètre (ce qui est confirmé par l'exemple de tunnels routiers construits depuis quelques dizaines d'années dans des formations similaires).

Les mesures de déformation continues dans les galeries du laboratoire de Meuse/Haute-Marne envisagées sur plusieurs années, notamment dans les sections de mesures au niveau principal à -490 m, permettront de vérifier ces ordres de grandeurs.

Pour des périodes excédant quelques décennies, l'évaluation de la vitesse de déformation s'appuie sur d'autres méthodes d'investigation : étude des mécanismes de déformation des minéraux et des déformations des couches géologiques depuis leur mise en place... *Les valeurs obtenues par modélisation pour les périodes longues montrent une certaine capacité à la déformation des argilites, mais dans des proportions telles qu'elle ne remet pas en cause la stabilité des ouvrages souterrains. Le déplacement des parois serait de 2 cm après 100 ans et de moins de 4 cm après 1000 ans.*

La déformation différée des argilites se traduit par une mise en charge progressive des ouvrages souterrains. Les revêtements des excavations souterraines puis, à plus long terme, les matériaux remplissant ces excavations permettent de reprendre les contraintes.

3.3 Un contexte hydrogéologique favorable

La compréhension du milieu géologique suppose aussi de disposer d'une vue d'ensemble des formations qui encadrent les argilites du Callovo-Oxfordien.

3.3.1 Une faible perméabilité des formations encadrant les argilites du Callovo-Oxfordien et des écoulements lents

Les mesures effectuées dans les forages sur le secteur d'étude ont mis en évidence *la faible perméabilité matricielle des formations encadrant les argilites du Callovo-Oxfordien*, notamment des formations calcaires de l'Oxfordien (de 10⁻⁹ à 10⁻⁷m/s) et du Dogger (de 10⁻¹⁰ à 10⁻⁸m/s), aquifères⁷ dans d'autres parties du bassin de Paris. Par exemple, le débit d'eau mesuré dans les puits du laboratoire souterrain lors de leur traversée des calcaires de l'Oxfordien est inférieur à 10 litres par minute. Ceci s'explique par l'importante recristallisation de ces calcaires qui a bouché les pores de la roche lors des processus diagénétiques qui se sont produits régionalement à l'échelle de la bordure est du bassin de Paris.

⁷ Une formation est réputée aquifère quand sa perméabilité est supérieure à 10⁻⁶m/s.



Reconstruction du paléoenvironnement à l'Oxfordien

Ces processus sont liés aux circulations dans les calcaires comme ceux de l'Oxfordien ou du Dogger, de fluides d'origine météorique qui ont progressivement remplacé les eaux marines originelles. Ils se caractérisent par des dissolutions près des zones d'affleurement et des précipitations lorsque la formation est sous couverture. Ces processus diagénétiques sont responsables des faibles porosités (6 à 10 %) et des perméabilités globales du Dogger et de l'Oxfordien plus faibles sur le secteur (d'un facteur 10 à 100) que celles mesurées au centre du bassin de Paris. Ces phénomènes n'ont pas eu d'influence sur les ciments carbonatés des argilites du Callovo-Oxfordien, plus imperméables et qui ont conservé leur signature marine originelle. Les caractéristiques pétrophysiques (porosité, perméabilité) des formations encaissantes, qui résultent de ces processus, ont été acquises sur la zone de transposition il y a au minimum 30 millions d'années comme l'indique l'absence de déséquilibre uranium 234/uranium 238 dans les matrices carbonatées.

Certains niveaux de l'Oxfordien carbonaté présentent une porosité plus élevée que le reste de la formation. Leur organisation apparaît directement liée aux conditions initiales de dépôt des sédiments. Cela explique leur géométrie globale organisée selon la stratification comme le montrent les données de sismique 3D enregistrées sur le site. C'est principalement dans ces niveaux, également plus perméables (jusqu'à 10⁻⁷m/s), que se font les circulations d'eau en profondeur.





Reconstitution de la morphologie des horizons poreux dans l'Oxfordien à partir de données sismiques 3D

Du fait des faibles perméabilités de l'Oxfordien et du Dogger, les écoulements y sont lents : les modélisations hydrogéologiques montrent, sur la zone de transposition, des vitesses de l'ordre du kilomètre par centaine de milliers d'années dans l'Oxfordien et même plus faibles pour le Dogger. Ces vitesses sont cohérentes avec les résultats des analyses isotopiques du chlore 36 et du carbone 14. *Les âges moyens des eaux de l'Oxfordien et du Dogger sont respectivement de l'ordre de 400 000 ans et de 1 million d'années.*

Enfin, les pressions hydrauliques mesurées dans l'Oxfordien et le Dogger sont proches et ne constituent pas, à l'échelle de la zone de transposition, un moteur efficace pour le déplacement de l'eau au sein dans le Callovo-Oxfordien. Compte tenu de la faible perméabilité des argilites, la vitesse d'écoulement vertical de l'eau (appréciée par la vitesse de Darcy) est de l'ordre de quelques centimètres en 100000 ans dans le Callovo-Oxfordien.

3.3.2 Des exutoires reconnus et une évolution prévisible

Les différents forages réalisés à l'échelle du secteur ont précisé le modèle hydrogéologique, d'une part grâce à la mesure des charges hydrauliques dans le Dogger et l'Oxfordien, d'autre part grâce à l'acquisition de données sur la porosité et la perméabilité des carbonates de ces deux formations. La modélisation hydrogéologique, qui intègre les données acquises et la représentation géologique d'ensemble du secteur, permet d'établir le schéma des écoulements sur le secteur.

Les écoulements dans les formations du Dogger et de l'Oxfordien sont globalement horizontaux, dirigés des zones d'alimentation que constituent les zones de plateaux au sud et à l'est du site, vers le centre du bassin de Paris. Cependant, au droit du site, du fait de la proximité des affleurements, une partie des écoulements dans l'Oxfordien se dirige vers un point bas local, dans le cours de la Marne au sud-ouest. Comme précisé ci-dessus, la modélisation hydrogéologique indique des transferts lents sur la zone de transposition. Au-delà de cette zone et à proximité des failles de la Marne, les écoulements pourraient être plus rapides en liaison avec des processus de dissolution le long de fractures dans l'Oxfordien (cette situation a été observée dans un des sondages réalisés en 2003) susceptibles d'augmenter la perméabilité globale des formations encaissantes. La modélisation des variations climatiques, tenant notamment compte de l'impact des actions humaines (dans le cadre du Climate Global Change), permet une prédiction raisonnable et partagée internationalement des grands changements climatiques (programme européen BIOCLIM) et de leurs conséquences sur les 200 000 prochaines années au moins (variations de température et de pluviométrie, changements dans la végétation). Ces changements climatiques, en particulier l'alternance de stades glaciaires et inter-glaciaires, constituent, avec le léger soulèvement des terrains, le moteur principal de l'érosion. Les écoulements en surface et en profondeur vont aussi évoluer à très long terme avec l'érosion.



Extension des calottes glaciaires et des principaux environnements lors du dernier maximum glaciaire (il y a environ 18 000 ans)

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le milieu géologique : le site de Meuse/Haute-Manne

L'étude des modifications du modelé topographique sur les deux derniers millions d'années donne des fourchettes d'approfondissement des vallées (environ 15 m par centaine de milliers d'années sur le secteur), de recul des reliefs de cuesta et d'ablation des terrains à la surface des plateaux (environ 2 à 3 m par centaine de milliers d'années sur le secteur) pour les différents cycles glaciaires, qui peuvent être extrapolées sur le futur. L'érosion conduira progressivement à la disparition des calcaires du Barrois avec mise à l'affleurement du Kimméridgien, voire de l'Oxfordien, au niveau du site du laboratoire.



Evolution de la morphologie du secteur de l'actuel jusqu'à un million d'années

Cette évolution possible au cours du prochain million d'années a été modélisée en trois dimensions et a servi de base à la modélisation des écoulements envisageables à des échéances de 500 000 ans et d'un million d'années. Seules les directions des écoulements dans l'Oxfordien montrent une évolution notable avec une disparition progressive des écoulements vers le centre du bassin de Paris au bénéfice de l'exutoire de la Marne au sud-ouest du secteur (vallée de la Saulx) et l'apparition d'un nouvel exutoire dans la vallée de l'Ornain à une dizaine de kilomètres au nord du site du laboratoire de Meuse/Haute-Marne.

RFS III.2.f. La barrière géologique : critères techniques de choix de site

« Le site devra être choisi de façon que la profondeur envisagée pour le stockage garantisse que les performances de confinement de la barrière géologique ne seront pas affectées de façon significative par les phénomènes d'érosion (notamment à la suite d'une glaciation), par l'effet d'un séisme, ou par les suites d'une intrusion « banale ». On devra considérer que l'épaisseur de la zone superficielle pouvant être ainsi perturbée est de l'ordre de 150 à 200 m ».

« Ces critères concernent, d'une part, la stabilité du site et, d'autre part son hydrogéologie.

Stabilité

La stabilité du site devra être telle que les éventuelles modifications des conditions initiales dues aux phénomènes géologiques qui peuvent survenir (glaciation, sismicité, mouvements néotectoniques) restent acceptables au regard de la sûreté du stockage.

En particulier, pour une période qui doit être égale au moins à 10 000 ans, la stabilité (qui englobe une évolution limitée et prévisible) doit être démontrée.

Ces phénomènes devront être évalués, pour chaque site reconnu, de façon qualitative et quantitative en se reportant à la situation actuelle, au passé proche (historique) et surtout au passé plus ancien (Quaternaire et éventuellement fin du Tertiaire). Ceci permettra d'apprécier les valeurs des paramètres les caractérisant ainsi que leurs variations, et d'en examiner l'influence [...].

Hydrogéologie

L'hydrogéologie du site devra être caractérisée par une très faible perméabilité de la formation-hôte et un faible gradient de charge hydraulique. Un faible gradient régional hydraulique sera par ailleurs recherché de préférence pour les formations environnantes de la formation-hôte.

Des mesures hydrogéologiques devront être réalisées sur une zone beaucoup plus large que le site de stockage de façon à bâtir des modèles d'écoulement prenant en compte les flux depuis les zones d'alimentation jusqu'aux exutoires. Ces schémas régionaux devront permettre de simuler l'intensité et la direction des circulations souterraines.

Il faudra prendre en compte les discontinuités ou hétérogénéités dont la nature et la géométrie pourraient tendre à amoindrir significativement l'efficacité de la barrière géologique. Ces objets devront donc être repérés et caractérisés avec la plus grande attention, de façon, s'il y a lieu, à les éviter au niveau du site ».

3.4 L'impact de la construction et de l'exploitation d'un stockage sur la formation-hôte

La construction et l'exploitation d'un stockage créent des sollicitations (thermiques, mécaniques, géochimiques, hydrauliques) sur la zone proche de la formation-hôte. Le programme de recherche vise à apporter les données nécessaires pour évaluer les conséquences des perturbations sur la formation-hôte et ses performances de confinement.

3.4.1 L'impact de la création d'ouvrages

3.4.1.1 La perturbation mécanique et l'endommagement de la zone autour des ouvrages (EDZ)

Le creusement des ouvrages souterrains perturbe la roche à leur pourtour, créant une zone endommagée *(EDZ)* susceptible de constituer un chemin préférentiel futur pour l'eau : selon la résistance de la roche et la profondeur des ouvrages, on observe une microfissuration et, éventuellement, des fissures dans un anneau à la paroi de l'ouvrage (zone fracturée). Ce phénomène, constaté autour d'ouvrages implantés dans des formations similaires, a été étudié depuis dix ans par des équipes de recherches de plusieurs pays tant sur échantillons d'argilites que dans le laboratoire souterrain du Mont Terri. Ce phénomène fait aussi l'objet de nombreuses expérimentations dans la galerie à -445 m et les galeries à -490 m du laboratoire de Meuse/Haute-Marne.

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le milieu géologique : le site de Meuse/Haute-Marne



Schéma conceptuel de la zone endommagée (EDZ)

Au cours des essais menés sur les argilites, on constate à partir d'un certain seuil de charge (11 à 13 MPa en compression uniaxiale) une microfissuration d'abord diffuse, puis de plus en plus organisée au fur et à mesure que la charge augmente (on parle d'endommagement mécanique). Lorsque la rupture est atteinte (elle est de type fragile quand la contrainte moyenne est faible), elle conduit à la création de fractures.

Des mesures de perméabilité sont faites systématiquement aussi bien dans le puits principal que dans les galeries pour connaître l'état d'ouverture initial des fractures. Leur conductivité hydraulique après resaturation a été mesurée en laboratoire sur des échantillons d'argilite fracturée du Callovo-Oxfordien.

Les modélisations ont conclu qu'une zone fracturée peut apparaître dans les zones les plus profondes de la formation d'argilites sur la zone de transposition (-630 m), là où les contraintes naturelles sont plus fortes. Son extension dépend de l'orientation des ouvrages : inférieure à 0,1 fois le rayon des ouvrages pour une orientation parallèle à la contrainte géomécanique principale majeure, inférieure à 0,3 fois le rayon des ouvrages pour une orientation parallèle à la contrainte mineure. Sa perméabilité maximale reste très faible (estimée à 5.10⁻⁹ m/s). A une profondeur moindre (environ 500 m comme à l'aplomb du laboratoire souterrain), la zone fracturée peut être absente dans le cas d'une orientation parallèle à la contrainte mineure.

Une zone microfissurée se développe au-delà de la zone fracturée. Son extension peut atteindre plusieurs mètres pour des ouvrages de diamètre décamétrique (0,5 à 0,7 fois le rayon pour une orientation parallèle à la contrainte majeure selon la profondeur) mais elle garde une perméabilité très faible (estimée à 5.10⁻¹¹ m/s) en raison de la connectivité limitée du réseau de microfissures.

EDZ autour des ouvrages : zone fracturée et zone microfissurée

Le creusement des ouvrages peut entraîner la création d'une zone endommagée en paroi de l'excavation dans laquelle on distingue :

- *une zone fracturée,* au voisinage immédiat de l'ouvrage. Elle se produit si le seuil de rupture, qui correspond à la résistance mécanique maximale de la roche, est dépassé ; elle se caractérise par l'apparition de fractures plus ou moins connectées qui peuvent augmenter la perméabilité de la roche ;
- une zone microfissurée. Elle se produit lorsque le seuil de fissuration est dépassé, soit au voisinage de l'ouvrage (si la zone fracturée n'est pas formée), soit derrière la zone fracturée. Elle résulte de la décharge mécanique liée au creusement des ouvrages : les déformations induites se traduisent par une microfissuration diffuse peu connectée. Cette faible connectivité limite l'augmentation de la perméabilité.

Au-delà de la zone microfissurée s'étend une zone dite « influencée » d'un point de vue mécanique qui est le siège de modifications limitées du champ de contraintes et de déformations, sans incidence sur les propriétés de la roche (notamment sa perméabilité).

Différentes observations sur échantillons d'argilites et au laboratoire de Mont Terri suggèrent que la perméabilité de l'EDZ a tendance à diminuer au cours de l'évolution géomécanique grâce au fluage et au gonflement des argilites qui provoquent la fermeture progressive des fractures. A très long terme, les propriétés de l'EDZ tendent ainsi à rejoindre celles de l'argilite non perturbée car les fractures se referment sous l'effet du retour à l'équilibre des contraintes.

Par précaution, l'Andra a conçu un dispositif (coupure hydraulique réalisée à l'aide d'une saignée remplie d'argile gonflante), pour intercepter l'anneau fracturé au droit de scellement et limiter les écoulements le long des galeries. Ce dispositif est l'objet de l'expérimentation KEY déjà mentionnée plus-haut.

Dans les niveaux supérieurs plus carbonatés de la formation du Callovo-Oxfordien (plus résistants que le niveau médian de la formation plus argileux), les observations et mesures faites dans les puits du laboratoire de recherche souterrain au niveau de la galerie à -445 m montrent qu'il ne se crée pas de fractures et que l'épaisseur de la zone microfissurée est de l'ordre de 0,1 à 0,2 fois le diamètre de l'ouvrage selon son orientation. Ces caractéristiques sont favorables car c'est au niveau de cette zone que pourrait être réalisé le scellement des puits d'un stockage.

3.4.1.2 La désaturation

L'exploitation d'un éventuel stockage nécessitera de ventiler les galeries : l'hygrométrie et la température de ce flux d'air constant étant différentes de celles du milieu, l'eau porale des argilites du Callovo-Oxfordien va être attirée vers la paroi extérieure des galeries et s'évaporer à son contact, l'air remplaçant progressivement l'eau dans l'argilite voisine des ouvrages (désaturation). Les observations dans des ouvrages anciens, par exemple au tunnel de Tournemire construit il y a une centaine d'années, montrent toutefois que ce phénomène de désaturation des argilites est lent.

Des essais sur échantillons ont permis d'estimer la vitesse de la désaturation et ses conséquences sur le comportement mécanique des argilites du Callovo-Oxfordien. *Ils ont notamment montré que :*

- la désaturation rigidifie l'argilite, ce qui renforce sa résistance mécanique. L'augmentation de résistance en compression uniaxiale liée à la baisse d'humidité relative est d'environ 0,45 MPa par degré d'humidité,
- l'extension de la zone désaturée autour des ouvrages ne dépasse pas l'extension de la zone endommagée.
 Son extension se stabilise assez rapidement pour ne plus progresser que de manière négligeable après une dizaine d'années.

Des mesures *in situ* dans le laboratoire souterrain doivent confirmer ces données (« l'*Observatoire Interdisciplinaire sur l'EDZ* ») : elles visent à caractériser la vitesse de désaturation de l'argilite dans la durée et observer ses effets sur le comportement mécanique à différents degrés d'humidité.

3.4.1.3 Les réactions d'oxydo-réduction

La pénétration de l'air introduit de l'oxygène dans l'argilite sur une profondeur qui correspond au maximum à l'extension de la zone désaturée. L'argilite contient des minéraux, comme la pyrite, et de la matière organique qui réagissent avec l'oxygène (réactions d'oxydo-réduction) et le consomment. Le rapport entre le volume d'oxygène entrant dans les argilites et celui qui est consommé est tel que l'oxygène est neutralisé. Les caractéristiques chimiques des argilites ne sont pas modifiées et les effets ainsi que l'extension de cette perturbation chimique sont très limités.

3.4.2 Les impacts des matériaux exogènes (ciments, bétons, métaux...)

3.4.2.1 Les liants hydrauliques (bétons et mortiers)

Ils sont susceptibles d'être largement utilisés dans un stockage, en particulier pour le revêtement des ouvrages souterrains. Au contact des fluides du milieu naturel, ils se dégradent très lentement (plusieurs dizaines de milliers d'années) et libèrent des éléments comme le silicium et surtout le calcium (le « panache alcalin ») qui peuvent modifier les propriétés de confinement du milieu géologique et des ouvrages à base d'argile gonflante au travers de changements minéralogiques.

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le milieu géologique : le site de Meuse/Haute-Marne

Le projet européen Ecoclay (17 organismes de huit pays européens) a étudié les phénomènes et conséquences liés à la propagation de ce panache alcalin dans des ouvrages en argile (bouchon d'alvéole, scellements) et dans l'argilite du site de Meuse/Haute-Marne. Il a conclu à une *faible extension de la perturbation alcaline dans le milieu géologique et à des effets limités sur les propriétés de transfert des argilites (vitesse de diffusion et perméabilité) et sur la capacité de gonflement des argiles des barrières ouvragées. La limitation des effets du panache alcalin est due au fort « pouvoir tampon » de l'argile. Cette perturbation peut encore être diminuée en recourant à des bétons dits « bas pH ». La simulation numérique du panache alcalin en situation de stockage à partir des modèles établis lors de ces travaux aboutit à une perturbation limitée qui ne dépasse jamais l'extension de la zone microfissurée et n'induit pas de modifications des propriétés hydrauliques.*

Les résultats des expérimentations dans le laboratoire de Meuse/Haute-Marne vont étayer les modèles élaborés en laboratoire de « surface ». Des échantillons de matériaux cimentaires sont mis en place dans les argilites du Callovo-Oxfordien et des expérimentations conduites pour valider sur le long terme les processus réactionnels.

3.4.2.2 Les matériaux métalliques

Les processus de corrosion des matériaux métalliques, largement envisagés dans les installations souterraines (soutènement des alvéoles, surconteneurs de colis) durant le stockage, ont donné lieu à de nombreuses études, notamment sur des analogues archéologiques. *Elles ont ainsi déterminé le seuil d'amorçage de la corrosion et sa vitesse en milieu argileux profond et ont montré qu'en l'absence d'oxygène, ce qui sera le cas du stockage après sa fermeture, les matériaux métalliques se corrodent en produisant des minéraux qui stabilisent leur dégradation.*

La corrosion des matériaux métalliques libère des ions du fer qui peuvent réagir avec les minéraux argileux et modifier leur composition. Les expérimentations qui visent à caractériser cette altération ont montré que les transformations minéralogiques sont limitées en intensité et dans l'espace ; elles restent de l'ordre de quelques centimètres.

La corrosion des matériaux métalliques conduit également à la production d'hydrogène sous forme de gaz dont l'interaction avec les argilites doit être prise en compte. Comme indiqué plus haut, une expérimentation en forage (EST363) a évalué la pression d'entrée de gaz dans la zone endommagée (2 à 3 MPa) et dans les argilites saines (entre 4 et 5 MPa), c'est-à-dire la pression nécessaire pour qu'un gaz puisse vaincre les forces capillaires s'exerçant sur l'eau dans les pores de la roche. Des expérimentations sur échantillons ont par ailleurs déterminé les paramètres d'écoulement biphasique (eau et gaz).

3.4.3 L'impact thermique des colis de déchets

Certains colis de déchets contiennent des éléments qui libèrent leur énergie sous forme de chaleur : il est donc important d'étudier tout impact thermique sur la formation-hôte.

Les expérimentations réalisées sur échantillons ont montré que les transformations minéralogiques des argilites du Callovo-Oxfordien résultant d'une telle phase thermique sont négligeables tant que les températures atteintes ne sont pas trop fortes et que la durée de la phase thermique n'est pas trop longue. Il a en particulier été montré qu'une température de 70 °C pendant 10 000 ans n'entraînait pas de perturbation sensible. On en a déduit les critères de dimensionnement, à savoir une température inférieure à 90 °C sur quelques siècles et un retour à une température inférieure à 70 °C avant 1000 ans.

L'influence de la température sur le comportement hydro-mécanique des argilites a par ailleurs été étudiée en laboratoire en faisant varier les températures et le degré de saturation des échantillons. Jusque vers 70°C, il n'y a quasiment pas d'effet visible sur les paramètres mécaniques (élasticité, seuil de plasticité, vitesse de fluage) ; au-delà, l'effet le plus notable est l'augmentation des vitesses de fluage.

4. La transposition des résultats du laboratoire à une plus grande échelle

L'étude de l'impact de la construction et de l'exploitation d'un éventuel stockage sur la formation-hôte, notamment des perturbations que pourraient induire les différentes sollicitations (thermiques, mécaniques, géochimiques, hydrauliques, hydriques), a été principalement menée sur le site du laboratoire souterrain grâce aux expérimentations et aux prélèvements d'échantillons.

Les nombreuses données détaillées obtenues sur le site du laboratoire de Meuse/Haute-Marne (notamment sondages et sismique 3D sur une emprise de 4 km²) et la connaissance géologique du secteur d'étude permettent une première évaluation de la capacité de la couche du Callovo-Oxfordien et de son environnement géologique à accueillir un éventuel stockage de déchets radioactifs.

C'est dans cette optique qu'a été développée la démarche de transposition qui vise à définir un domaine géographique que l'on peut considérer géologiquement équivalent au site du laboratoire souterrain, tant du point de vue des propriétés de confinement de la formation que des caractéristiques des perturbations qu'engendrerait un stockage.

4.1 Les fondements de la démarche de transposition

Pour définir la démarche de transposition, on s'intéresse aux différentes caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien qui contribuent à sa capacité de confinement. Celles-ci doivent être abordées à l'échelle de la couche dans son ensemble, de sa géométrie (épaisseur) et des facteurs qui pourraient nuire à son homogénéité (lacunes sédimentaires, failles transmissives).

A cette échelle, on doit également prendre en compte les facteurs géométriques qui seraient susceptibles de faire varier son comportement vis-à-vis d'un éventuel stockage, c'est le cas de la profondeur qui influe sur le comportement mécanique.

Les capacités de confinement doivent être également abordées au niveau de l'agencement fin des constituants de la couche qui lui confèrent ses propriétés de transport et de rétention.

A l'échelle de la formation toute entière, c'est avant tout l'homogénéité de la couche, à la fois dans la distribution verticale des niveaux et leur continuité latérale, qui doit être examinée. Les failles sont susceptibles d'interrompre la continuité des couches sédimentaires ou d'en modifier les propriétés « en grand », essentiellement la perméabilité. L'extension de la zone de transposition doit donc exclure les failles identifiées. Il faut aussi prendre en compte les variations d'épaisseur brutales, potentiellement liées à une faille, et les absences de corrélation significative entre niveaux identifiés, qui peuvent correspondre à d'importantes lacunes de sédimentation.

L'épaisseur de la couche sur la zone de transposition doit également être supérieure ou égale à celle observée sur le site du laboratoire (plus l'épaisseur est importante et plus les capacités de confinement sont élevées) et sa profondeur ne doit pas excéder une limite au-delà de laquelle des critères de résistance géomécanique ne pourraient plus être satisfaits.

A l'échelle des minéraux et de leur agencement dans la roche, les propriétés de confinement des argilites du Callovo-Oxfordien résultent, comme pour tout autre matériau :

 - d'une part, des propriétés intrinsèques des différents constituants, donc de leurs proportions relatives et de leur répartition dans la roche (par exemple, la conductivité thermique de l'argilite dépend de la proportion de grains de quartz et de calcite qui sont bons conducteurs de chaleur, mais aussi de la manière dont ils se sont déposés durant la formation de la roche, donc de leur dispersion dans la roche), - d'autre part, de la géométrie des pores de la roche qui conditionne les possibilités de déplacement de l'eau ou des éléments chimiques en solution dans celle-ci. Cette géométrie est due à l'agencement des minéraux qui composent la roche au moment de leur dépôt et aux processus diagénétiques survenus durant l'histoire géologique postérieure, notamment les phénomènes de colmatage. On recherche donc ce qui, en termes de conditions de dépôt et de diagenèse, pourrait faire varier spatialement la géométrie des pores de la roche (répartition des minéraux, façon dont ils se sont déposés, changement de nature ou d'intensité des colmatages...).

Définir un domaine géographique géologiquement équivalent au site du laboratoire souterrain, revient alors à connaître les conditions d'environnement qui ont présidé à la nature des minéraux constituant la formation du Callovo-Oxfordien, à leur agencement et à la géométrie de la porosité à toutes les échelles. On dispose autour du laboratoire souterrain d'une exploration détaillée sur une zone géographique couvrant environ 700 km² grâce aux profils sismiques 2D et aux forages pétroliers, aux forages réalisés entre 1994 et 1996, à la campagne de forages (FSP) de 2003 et aux travaux cartographiques de surface. Les études géologiques menées depuis 1994 permettent ainsi de déterminer les zones où ces conditions peuvent conduire à des situations notablement différentes de celles du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

4.2 Les possibilités actuelles de transposition

Les travaux de reconnaissance géologique ont établi une cartographie précise des failles. Si on exclut les grandes structures tectoniques (failles de la Marne, fossé de Gondrecourt...) qui bordent la zone reconnue, aucune faille importante à déplacement vertical n'a été mise en évidence dans la formation du Callovo-Oxfordien, ni dans les horizons sus-jacents de l'Oxfordien, ni dans la partie supérieure du Dogger sous-jacent dans la moitié septentrionale de la zone reconnue (700 km²). La zone de transposition exclut ainsi les abords des grands accidents reconnus à l'est et à l'ouest du secteur.



Comparaison de diagrapraphies obtenues en forages sur le site (EST 210) et à l'échelle du secteur, montrant la bonne corrélation des différentes séquences du Callovo-Oxfordien

Au regard de l'épaisseur de la formation, une cartographie précise de la formation du Callovo-Oxfordien définit clairement ses limites hautes et basses, très facilement repérables sur les données sismiques. Les différents forages ont confirmé cette cartographie :

 - en partant du site du laboratoire souterrain, l'épaisseur de la formation du Callovo-Oxfordien augmente en allant vers le nord-est du secteur étudié, du fait des conditions de dépôt des argilites, ce qui accroît la capacité de confinement, - la profondeur du milieu de la formation (-490 m dans le laboratoire souterrain) diminue légèrement sur une petite zone à l'est et au sud du laboratoire (les perturbations mécaniques y seraient moins fortes) et augmente sur le reste de la zone géographique reconnue, sans toutefois que les perturbations mécaniques changent de nature tant que la profondeur reste inférieure à -630 m, profondeur retenue pour garantir un comportement mécanique analogue à celui déterminé sur le site du laboratoire souterrain (cette profondeur est atteinte dans l'angle nord-ouest du secteur, grossièrement limité au sud par le Val d'Osne et à l'est par la vallée de la Saulx).

Pour la minéralogie, les diagraphies effectuées dans tous les forages de la zone reconnue ont repéré, comme dans les forages du laboratoire souterrain, les trois mêmes séquences de sédimentation dans la formation, ce qui permet d'assurer la représentativité du laboratoire souterrain par rapport à une large zone géographique. Elles montrent également que les différents niveaux du Callovo-Oxfordien sont corrélés sur de grandes distances (plusieurs dizaines de kilomètres) et que leur agencement n'est pas perturbé par des variations de faciès ou des lacunes de sédimentation susceptibles de modifier leurs propriétés hydrauliques.

Les conditions de dépôts et de diagénèse ayant été relativement uniformes, l'arrangement des minéraux varie peu, ce qui conduit à une géométrie de la porosité, donc à une perméabilité et à des vitesses de diffusion, relativement constantes sur la majeure partie du secteur étudié.

Au final, l'ensemble des résultats de ces études délimite un domaine géographique, géologiquement équivalent au site du laboratoire souterrain, d'environ 200 km² au nord et à l'ouest du laboratoire souterrain.



ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le milieu géologique : le site de Meuse/Haute-Marne

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

euse. Dossier 2005 Argile

Dossier 2005 Argile

se. Dossier 2005 Argile

Le stockage -Les installations

p.106 > 1. La démarche de conception

p.108 > 2. Configuration d'ensemble des installations

p.111 > 3. Les colis et les alvéoles de déchets B

p.121 > 4. Les colis et les alvéoles de déchets C

p.132 > 5. Le stockage de combustibles usés

p.137 > 6. Les puits et les galeries d'accès

p.141 > 7. Les installations de surface

Le stockage -Les installations

1. La démarche de conception

Les études menées par l'Andra visent à concevoir une installation de stockage sûre et à évaluer la faisabilité de sa mise en œuvre opérationnelle dans les argilites du Callovo-Oxfordien du site de Meuse/Haute-Marne, tout en s'inscrivant dans une logique de réversibilité.

Pour évaluer les solutions concrètes en lien avec les caractéristiques des déchets et de la formation géologique étudiée, l'Andra a retenu des options techniques de conception et les a étudiées sous les angles de leur ingénierie, de leur comportement aux différentes échelles de temps et de leur sûreté. Les résultats des études, complétés par le retour d'expérience industriel d'installations similaires, permettent de vérifier la possibilité de dimensionner, construire et exploiter industriellement une installation de stockage sûre et réversible.

· Des concepts préliminaires aux solutions concrètes

La conception préliminaire d'une installation de stockage consiste à :

- définir une architecture d'ensemble du stockage et ses modalités d'implantation dans le milieu géologique dont elle doit préserver les qualités de confinement,
- choisir les options de conception, c'est-à-dire identifier les composants du stockage et leurs rôles ainsi que les principes de fonctionnement,
- définir les spécifications techniques pour le dimensionnement et les composants (matériaux, dimensionnement, plans),
- définir les procédés de réalisation de ces composants et les procédés d'exploitation,
- intégrer ces procédés dans une organisation industrielle pour la construction, l'exploitation et la fermeture éventuelle du stockage.

Les recherches visent à proposer des options simples et robustes, non optimisées, destinées à permettre d'évaluer la faisabilité d'un stockage. Les architectures proposées ne représentent qu'une solution possible parmi d'autres, susceptible d'évoluer.

Jusqu'en 2001, l'Andra a étudié diverses architectures, dites « concepts préliminaires » : il s'agissait d'explorer une gamme d'options assez vaste pour traiter les différentes problématiques et solutions techniques, en lien avec leur faisabilité, leur sûreté et leur réversibilité. Plusieurs types de géométries de stockage, de matériaux, de modes d'exploitation et de manutention ont ainsi été étudiés.

Durant l'année 2002, à partir des enseignements des recherches, l'Andra a retenu un nombre limité de concepts qui ont constitué la base des études menées jusqu'en 2005 et permis une analyse plus approfondie de la conception du stockage, de sa sûreté, de sa réversibilité. Ces concepts visent des solutions concrètes et justifiées afin de disposer, pour chaque colis de déchets, d'un concept permettant d'évaluer la faisabilité de son stockage dans l'argilite du Callovo-Oxfordien sur le site de Meuse/Haute-Marne.

Le stockage est conçu autour d'une architecture modulaire et flexible constituée de briques élémentaires, ou modules de stockage, aptes à recevoir un ensemble de colis aux caractéristiques proches. Les choix effectués en 2002 portent sur les options de conception de ces modules, plus particulièrement sur :

 - la conception des colis de stockage : les colis primaires, fournis par les producteurs, peuvent être complétés par des dispositifs additionnels (surconteneurs) pour constituer des colis de stockage. Leurs dimensions et leurs matériaux ont été étudiés en lien avec les possibilités technologiques de fabrication, leurs performances et leurs modes de manutention, - *les cavités souterraines ou « alvéoles de stockage »* où sont déposés les colis de déchets : géométries et dimensions, méthodes possibles de réalisation, principes de mise en place des colis, principes de fermeture de l'alvéole, si le choix en est fait après une période d'observation.

Des architectures flexibles

Les architectures de stockage ont été étudiées pour pouvoir accueillir différentes catégories de colis (déchets B et C, combustibles usés le cas échéant). Les solutions proposées sont suffisamment flexibles pour tolérer des modifications d'inventaires et de modes de gestion des colis de déchets. En particulier, chaque famille de colis peut être accueillie, indépendamment du fait que les autres familles le soient. Cette recherche de flexibilité conduit à envisager une répartition des catégories de colis (B, C, CU) dans des zones distinctes et une réalisation progressive des installations de stockage par modules (modularité).

• Des options qui montrent la faisabilité technique, mais ne figent pas définitivement l'architecture et la conception d'un stockage

Les études d'ingénierie ont permis de définir et de dimensionner les différents composants, puis de vérifier la faisabilité de leur mise en œuvre industrielle (construction, exploitation, sécurité opérationnelle...). Les principaux points de la conception ont été étudiés, en s'appuyant autant que possible sur les retours d'expérience industriels existants dans les domaines nucléaire, minier et du génie civil. Les options proposées, et qui sont décrites par la suite, ne figent pas l'architecture d'un stockage. Elles constituent à ce stade une vision technique de ce que pourrait être une installation de stockage, mais qui est susceptible d'évoluer ; un travail important demeurerait en effet à réaliser dans la perspective d'un développement industriel du projet, afin d'approfondir les études d'ingénierie d'un tel stockage.

Coût indicatif du stockage

Des évaluations du coût du stockage ont été conduites en lien avec les études de conception. Au stade d'une étude de faisabilité il ne peut s'agir que d'évaluations affectées d'incertitudes, tant certains risques identifiés peuvent conduire à des chiffrages plus élevés ou des optimisations de la conception peuvent mener à des économies.

Les évaluations menées par l'Andra s'appuient sur l'expertise de grandes ingénieries et entreprises du nucléaire et des travaux publics et miniers, sur le retour d'expérience industriel de la seule installation de stockage géologique actuellement en exploitation (le Waste Isolation Pilot Plant - WIPP implanté à 600 m de profondeur dans l'état du Nouveau Mexique aux Etats-Unis) et sur les pratiques actuelles pour les taxes et assurances.

Pour le scénario avec traitement de l'ensemble des combustibles (UOX et MOX), le coût indicatif du stockage est de l'ordre de 15 milliards d'euros. Ce scénario ne prétend pas figer une stratégie industrielle de gestion de l'aval du cycle. Aussi, en fonction des hypothèses retenues dans une telle stratégie, le coût pourrait être modifié.

Trois grands postes structurent le coût du stockage :

- le coût d'investissement (40 %) comporte la construction des installations de surface, la construction et la fermeture des installations souterraines et le conteneurage des colis primaires en colis de stockage,
- le coût d'exploitation (40 %) comprend les frais de personnel, la maintenance et le renouvellement des équipements (jouvence), l'énergie et les consommables, pour une durée d'exploitation d'ordre séculaire,
- les coûts divers (20%) couvrent principalement les impôts et taxes, les assurances, les coûts d'études.

2. Configuration d'ensemble des installations

Une installation de stockage comprendrait des installations de surface, des ouvrages reliant la surface et le fond, ainsi que des installations souterraines. Ces différentes installations permettent la construction progressive du stockage, la prise en charge des colis de déchets en surface, leur transfert et leur mise en place en souterrain, l'observation et la surveillance, ainsi que la fermeture des différentes ouvrages lorsqu'elle est décidée dans le cadre d'une gestion réversible du processus de stockage.

2.1 Description générale des installations de surface



Les installations de surface comprennent les bâtiments d'accueil des colis primaires, les ateliers de préparation des colis de stockage ainsi que des entreposages tampons pour réguler les flux des procédés industriels. Les déblais issus du creusement des installations souterraines sont entreposés sur une verse ; ils seront ensuite employés comme matériau de remblais.

Installations de surface (projet)

2.2 Description générale des ouvrages de liaison fond-jour

Pour assurer la liaison entre le jour et le fond, les études de conception ont conduit à proposer *quatre puits ayant chacun une fonction spécifique : descente des colis, descente et remontée du personnel, service (déblais, gros matériels), ventilation assurant le renouvellement de l'air.* De diamètres classiques (6 à 12 m), ils sont équipés de dispositifs éprouvés ayant montré leur fiabilité dans le monde minier. En lien avec l'architecture en cul-de-sac, ils sont regroupés dans une même zone et situés en amont hydraulique des zones de stockage. Des scellements sont construits dans les puits lorsque leur fermeture est décidée pour s'opposer aux circulations d'eau.

A ce stade, l'option d'une descenderie (galeries inclinées en spirale utilisées dans les mines pour l'accès au fond) n'est pas retenue mais constitue une variante intéressante, susceptible d'offrir davantage de flexibilité pour la fonction de transfert des colis.

2.3 Description générale des installations souterraines

2.3.1 L'organisation générale

• L'architecture proposée pour les installations souterraines est horizontale et de faible extension verticale. Pour maximiser les épaisseurs d'argilites situées au-dessus et au-dessous du stockage, les ouvrages sont placés au milieu de la formation sur un seul niveau.

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le stockage - Les installations

• Les zones de stockage sont distinctes selon les déchets et le stockage est fractionné en sous-ensembles : les différentes catégories de colis (B, C et le cas échéant CU) sont stockées dans des zones distinctes subdivisées en modules et alvéoles qui accueillent les colis. Dans la zone B, un module correspond à une alvéole unique ; dans les zones C (et CU), il regroupe une à plusieurs centaines d'alvéoles. Les modules sont construits et remplis au fur et à mesure des besoins du stockage. Plusieurs peuvent être en construction ou en exploitation simultanément dans la même zone.



Organisation générale du stockage

Chacun des sous-ensembles présente une topologie en cul-de-sac et peut être isolé des autres par des scellements. Ces dispositions limitent les interactions entre zones de stockage et renforcent la robustesse du système. Ce compartimentage simplifie aussi la compréhension et la modélisation du comportement du stockage. Enfin, l'architecture modulaire sert l'objectif de souplesse dans la gestion et le développement du stockage, donnant une capacité d'action sur la réalisation du stockage et ménageant une possibilité d'évolution de sa conception.

• **Des galeries d'accès** spécialisées relient les puits et les zones de stockage : transfert pour les colis, travaux pour la construction, le scellement et le remblayage, ventilation. Ceci contribue à la bonne gestion de la coexistence des activités de construction (creusement des alvéoles), d'exploitation nucléaire (mise en stockage des colis) et d'aérage.

• Les alvéoles, les galeries et les puits sont dotés, lorsque leur fermeture est décidée, de scellements constitués de bouchons d'argile gonflante faiblement perméables qui s'opposent à la circulation d'eau dans le stockage. Les galeries de manutention, les galeries d'accès et les puits sont ensuite remblayés pour garantir la stabilité mécanique de l'ensemble du stockage.

Recherche de compacité des installations souterraines

La compacité est motivée par :

- une réduction du volume excavé, limitant le coût de mise en œuvre ainsi que le volume de déblais à stocker en surface,
- l'utilisation optimale de l'emprise souterraine dans le Callovo-Oxfordien,
- une simplification du réseau de galeries, facilitant l'exploitation.
2.3.2 La zone de stockage B

La modularité de cette zone permet de séparer les différents types de colis afin de faciliter la compréhension d'ensemble du système, notamment de distinguer les colis de déchets sans matière organique et ceux qui en contiennent. L'emprise de cette zone serait de l'ordre d'une centaine d'hectares.

Les alvéoles B sont des tunnels sub-horizontaux, longs de 250 m et de 12 m de diamètre au maximum, où les colis sont empilés sur plusieurs niveaux. Un revêtement de béton assure la stabilité mécanique de l'ouvrage. Retenu pour sa durabilité favorisant la réversibilité, le béton exerce en outre une fonction de protection chimique des colis et contribue ainsi à la rétention de radionucléides.

Lorsque la fermeture de l'alvéole est décidée, les jeux, très limités, entre colis et parois de l'alvéole ne sont pas comblés pour faciliter les opérations de fermeture et la récupération éventuelle des colis ; la galerie d'entrée est scellée par un bouchon en argile gonflante. Chaque alvéole de déchets B constitue à long terme un compartiment isolé des autres.

Les colis de stockage de déchets B

Les déchets B recouvrent une grande diversité de colis primaires par leurs conditionnements, géométries, contenus radiologiques et chimiques. Pour simplifier l'exploitation du stockage, les colis primaires sont placés dans des conteneurs parallélépipédiques en béton. Le colis de stockage ainsi constitué peut regrouper 1 à 4 colis primaires. Sa masse est de 6 à 25 tonnes environ et ses dimensions comprises entre 1,20 m et 3 m.

2.3.3 La zone de stockage C

La zone de stockage des colis C peut également être séparée en sous-zones : une pour le stockage de déchets C anciens (déchets CO) qui comprendrait 200 alvéoles, et deux autres pour le stockage des déchets C actuellement produits ou à produire, qui compteraient chacune 6 modules de 400 alvéoles, soit 4800 alvéoles au total. L'emprise de cette zone, environ 500 ha dans le cas du scénario S1a avec traitement de tous les combustibles UOX et MOX et mise en stockage des colis après 60 ans de refroidissement pour les concepts étudiés, est largement déterminée par des considérations thermiques, notamment la durée d'entreposage préalable des colis primaires ; elle serait ainsi réduite de près de moitié après un doublement de la durée d'entreposage.

Les alvéoles de déchets C sont des tunnels horizontaux borgnes de 0,7 m de diamètre et 40 m de long. Ils sont revêtus d'un chemisage métallique qui soutient les argilites et permet la mise en place et la récupération éventuelle des colis. Ils accueillent une unique rangée de 6 à 20 colis de stockage, selon leur puissance thermique. Les colis dont la puissance thermique est modérée sont stockés côte à côte ; sinon, ils sont séparés par des intercalaires (colis inerte ne contenant pas de déchets mais permettant d'espacer les colis de déchets pour diminuer le flux de chaleur).

Lorsque sa fermeture est décidée, l'alvéole est scellée par un bouchon d'argile gonflante.

Les colis de stockage pour déchets C vitrifiés

Pour interdire l'arrivée d'eau aux déchets pendant la phase thermique, chaque colis primaire est placé dans un surconteneur étanche en acier non allié, dont l'épaisseur (55 mm) est dimensionnée de manière très conservatrice pour résister à la corrosion. Sa durée de vie est estimée à plusieurs milliers d'années. Le colis de stockage standard a une masse de 1,7 à 2 tonnes, une longueur de 1,25 à 1,60 m et un diamètre d'environ 0,6 m.

Le stockage de combustibles usés

Le stockage des combustibles usés (CU) a été étudié dans le cas où ils ne seraient pas traités. Les CU issus des réacteurs d'EDF pourraient être placés dans une enveloppe cylindrique en acier contenant 1 ou 4 assemblages selon le type de combustible. L'épaisseur de cette enveloppe (110 à 120 mm) assure une étanchéité sur une durée d'au moins 10 000 ans. La conception du colis assure la maîtrise du risque de criticité aux différentes échelles de temps. Le colis à 4 assemblages pèse 43 tonnes environ, pour 1,25 m de diamètre et 5 m de long ; le colis à un seul assemblage pèse de 8 à 10 tonnes, pour 0,6 m de diamètre et 4,5 m de long.

Les alvéoles de CU seraient, dans leur principe, similaires aux alvéoles C, leur conception étant également subordonnée au dimensionnement thermique. Ce sont des tunnels horizontaux borgnes (40 m de long) contenant une unique rangée de colis espacés par des intercalaires. Toutefois, à la différence des alvéoles C, une barrière ouvragée d'argile gonflante est prévue entre le colis et la formation géologique. Cette barrière est pourvue d'un chemisage interne pour introduire et éventuellement retirer les colis.

3. Les colis et les alvéoles de déchets B

3.1 Les besoins

Les colis primaires de déchets B représentent plus de 80 % en nombre (environ 200000 colis primaires) et plus de 90 % en volume (environ 80000 m³ de colis primaires) des déchets HAVL.

Ils présentent une très grande diversité par :

- leurs dimensions (diamètre de 0,4 à 1,5 m, hauteur de 0,7 à 1,7 m, masse de 0,3 à 7 tonnes),
- leurs systèmes de préhension et de manutention qui sont spécifiques à chaque installation d'origine (plus d'une dizaine),
- les matériaux de leurs conteneurs (acier noir, acier inoxydable, béton, béton fibré, béton armé),
- leurs contenus radiologiques : les colis de déchets B ont, pour la plupart, un niveau de rayonnement nécessitant une protection radiologique du personnel.

Les solutions étudiées pour la conception des colis de stockage et des alvéoles visent à répondre aux besoins de gestion opérationnelle tout en respectant les objectifs de sûreté à long terme.

3.1.1 Regrouper les colis primaires dans des conteneurs standards

La manutention des colis primaires de déchets B implique une multiplicité de processus d'exploitation à l'opposé de la recherche d'une solution simple. Il est donc proposé de regrouper les colis primaires dans des conteneurs de stockage standardisés. Cette solution permet de minimiser les flux manutentionnés et de standardiser les équipements d'exploitation et les ouvrages souterrains ; elle contribue donc à la simplicité et à la robustesse de l'exploitation réversible du stockage.

3.1.2 Rechercher la compacité du stockage

Le volume représenté par les colis de déchets B conduit à rechercher des solutions compactes qui limitent le volume de roche excavé et restent compatibles avec la maîtrise de l'endommagement de la roche (et de la température pour certains colis faiblement exothermiques).

Cette recherche de compacité du stockage a conduit à ne pas intégrer de protection radiologique aux conteneurs : l'augmentation de taille du conteneur limiterait le nombre de colis de stockage par alvéole et imposerait de construire davantage d'alvéoles.

3.1.3 Assurer la sûreté en phase d'exploitation

En complément des moyens mis en œuvre pour la sûreté opérationnelle du stockage, les alvéoles et colis de déchets doivent être conçus et gérés de manière à :

- protéger le personnel du rayonnement des colis et des risques de dissémination radioactive. Du fait de l'absence de fonction de radioprotection intégrée aux colis de stockage, leur mise en place et leur retrait éventuel ainsi que les opérations de surveillance et de maintenance doivent être téléopérés. L'alvéole doit être conçue pour satisfaire ce fonctionnement et le faciliter,
- gérer les gaz (hydrogène surtout) susceptibles d'être produits par certains colis primaires. Certains colis primaires produisent de l'hydrogène par radiolyse des matériaux (matières organiques, matériaux d'enrobage comme le bitume...). L'accumulation excessive d'hydrogène dans le conteneur de stockage entraîne un risque de rupture des colis. Il doit donc être conçu pour laisser s'échapper l'hydrogène. Par ailleurs, une attention particulière est portée à la maîtrise des risques liés à la présence d'hydrogène dans l'air des alvéoles et galeries. Des mesures de prévention, de détection et de protection spécifiques sont envisagées,
- assurer la stabilité mécanique des ouvrages pendant leur exploitation. Bien que rigide, l'argilite du Callovo-Oxfordien n'est pas assez résistante mécaniquement pour que les excavations à 500 m de profondeur soient auto-stables. Un revêtement des ouvrages permet de gérer ce risque pendant l'exploitation et au-delà, pour permettre une réversibilité plus aisée.

3.1.4 Assurer la sûreté à long terme après fermeture du stockage

Pour réaliser les fonctions de sûreté à long terme, la conception et les méthodes de réalisation des alvéoles cherchent à :

- limiter les perturbations mécaniques (microfissures, voire fractures) et chimiques induites par le stockage sur les argilites pour préserver les propriétés favorables du milieu. La méthode de creusement, la géométrie et l'orientation des alvéoles de stockage ont été étudiées pour limiter les perturbations mécaniques dues au creusement. La maîtrise à long terme de ces perturbations, après rupture du revêtement de l'alvéole (après un millier d'années environ), est assurée par la limitation du taux de vide dans l'alvéole (dans et entre les colis de stockage) pour que leur résorption à terme ne provoque pas de trop grandes déformations. L'Andra a par ailleurs évalué et vérifié le caractère limité des perturbations chimiques sur les propriétés de rétention des argilites dans les conditions de conception et d'exploitation envisagées,
- maîtriser la circulation d'eau autour et dans les modules et alvéoles. La maîtrise de la circulation d'eau dans les alvéoles permet de freiner les cinétiques d'altération des colis de déchets ; elle impose que les radionucléides migrent essentiellement à travers la barrière géologique, pour bénéficier des bonnes propriétés de rétention des argilites du Callovo-Oxfordien. Pour y parvenir, la conception de l'alvéole doit interdire la convection de l'eau dans l'alvéole. Pour cela, une isolation hydraulique constituée d'un scellement de faible perméabilité est prévue entre l'alvéole et les galeries de liaison,
- protéger les déchets, limiter la dissolution des radionucléides, protéger les colis des agressions physicochimiques pour contribuer à la rétention des radionucléides. Le conteneur et l'alvéole de stockage peuvent limiter le relâchement des radionucléides contenus dans les déchets en contrôlant les possibilités de dégradation chimique des déchets (corrosion par exemple) et de leur matrice d'enrobage (bitumes par exemple), ainsi que la solubilité des radionucléides. Le matériau retenu pour le conteneur et l'alvéole permettent d'imposer des conditions physico-chimiques dans l'alvéole, en particulier un pH alcalin compris entre 7 et 12,5, qui favorisent l'immobilisation de certains radionucléides.

3.1.5 Assurer la réversibilité et garantir aux colis la robustesse nécessaire à leur éventuelle récupération

La réversibilité du stockage conduit à rechercher :

- la possibilité d'un retrait des colis de stockage avec les moyens utilisés pour leur mise en place,
- une durabilité des colis de stockage : l'Andra a retenu une formulation de béton favorisant l'absence de réactions chimiques susceptibles d'engendrer des dégradations précoces,
- la durabilité des ouvrages lors de leur conception, pour conserver le plus longtemps une géométrie peu déformée des ouvrages, en particulier en maintenant des jeux opérationnels pour retirer les colis avec des moyens analogues à ceux de leur mise en place. Les matériaux et le dimensionnement préliminaire proposés par l'Andra pour les ouvrages en béton des alvéoles et des galeries d'accès répondent à ce besoin,
- la modularité en cohérence avec l'exploitation progressive du stockage.

3.2 Le conteneur de stockage B

La conception du conteneur de stockage, en particulier sa géométrie, est liée à celle de l'alvéole de stockage dans une optique *de compacité du stockage et de simplicité des processus d'exploitation*.

3.2.1 Description du conteneur

Le concept proposé est un conteneur préfabriqué en béton armé légèrement fibré, empilable, contenant de 1 à 4 colis primaires de 3 m de large et 3 m de haut maximum, avec une masse ne dépassant pas 30 tonnes. Les performances de son matériau et son dimensionnement mécanique lui confèrent une durabilité à une échelle de temps séculaire nécessaire à la réversibilité. Les conteneurs sont dimensionnés pour pouvoir être empilés (jusqu'à 4 niveaux) et apporter une résistance mécanique limitant les conséquences d'une chute sur les colis primaires qu'ils renferment.

• Sa géométrie parallélépipédique s'adapte au mieux aux dimensions et à la cavité de l'alvéole et limite les vides à la seule mise en place des colis : elle optimise ainsi la compacité du stockage. Elle offre aussi la possibilité de laisser en l'état les vides résiduels entre colis lors de la fermeture de l'alvéole, ce qui facilite la récupérabilité des colis dans une optique de réversibilité.

• Le conteneur est conçu pour évacuer l'hydrogène produit par certains colis primaires.

• Le béton peut, par ses caractéristiques intrinsèques, *apporter la durabilité pluriséculaire recherchée et créer un environnement physico-chimique favorable* (par exemple, conditions de pH alcalin réduisant la corrosion des éléments métalliques) qui contribue à limiter le relâchement de radionucléides vers le milieu géologique. La recherche de résistance mécanique (à la compression comme à la traction par flexion) et de tenue à la chute ont conduit à retenir un béton de haute performance (BHP 75 MPa). Les fibres et les armatures sont en acier inox pour se prémunir des risques de corrosion ; elles garantissent une tenue en traction/flexion (de l'ordre de 5 MPa) et réduisent les risques de microfissuration.

Le conteneur de déchets B

- Le conteneur de déchets B est composé de deux parties préfabriquées :
- le corps comporte des logements ajustés à la taille des colis primaires pour limiter le volume de vide interne au seul jeu mécanique de mise en place des colis primaires. En partie supérieure, un espace supplémentaire laisse le passage aux pinces de manutention. L'épaisseur des parois externes est de 110 mm,
- le couvercle est une plaque posée sur l'intérieur des voiles latéraux externes et qui s'appuie sur la partie centrale du conteneur. Son épaisseur est de 150 mm. La fermeture du conteneur est réalisée par un liant hydraulique (joint de clavage) qui assure la cohésion du couvercle avec le conteneur. Pour s'affranchir du risque d'arrachement en cas de chute du conteneur, le couvercle est aussi fixé au corps par 5 tirants filetés en acier inoxydable.



Conteneur de stockage standard (illustration pour colis type B2)

Dimensionnement du conteneur en cas de chute en alvéole

L'intégrité mécanique du conteneur en cas de chute (hauteur de 6 m) dans l'alvéole de stockage n'est pas le critère de dimensionnement du conteneur : l'objectif est de vérifier que le colis primaire conserve son intégrité et maintient le confinement des matières radioactives. Les calculs ont validé les épaisseurs retenues pour le conteneur. Ils seront confortés par un programme de caractérisation du comportement du conteneur en dynamique : essais de traction directe du béton, développement d'outils de simulation du comportement du béton en dynamique, validation par essais de chute sur des démonstrateurs en vraie grandeur.

3.2.2 La fabrication du conteneur B

Le principe de fabrication du conteneur consiste à maximiser le nombre d'étapes mises en œuvre en contexte non irradiant pour optimiser les coûts et pouvoir contrôler de façon exhaustive la qualité de fabrication. Les corps et les couvercles peuvent ainsi être préfabriqués en usine, hors contexte nucléaire, par une technique de moulage. Les autres opérations seraient réalisées en cellules blindées dans les installations de surface du stockage : chargement des colis primaires dans le conteneur, fermeture du colis de stockage (par joint de clavage ou liant hydraulique) et contrôle du colis avant transfert vers les alvéoles de stockage.

Les démonstrateurs en vraie grandeur réalisés en 2004 ont montré la faisabilité technique des options proposées ainsi que la bonne maîtrise des procédés permettant d'obtenir des objets conformes aux exigences de qualité (en particulier absence de fissuration). Un programme de tests est en cours en 2005 pour confirmer les performances du procédé de fermeture et le comportement du conteneur à la chute.

Compatibilité avec les options d'entreposage longue durée

Les études de conception du conteneur ont été menées en liaison avec le CEA afin d'assurer une identité des objets étudiés pour l'entreposage de longue durée (ELD) et le stockage. Le concept proposé répond ainsi aux exigences du stockage à long terme et à celles de l'entreposage de longue durée :

- durabilité du conteneur sur une période de plusieurs siècles,
- possibilité de reprise du colis primaire après une phase d'entreposage de longue durée,
- diffusion, en situation d'entreposage, de l'hydrogène dégagé par les colis primaires par le couvercle du conteneur, pour privilégier la protection des colis primaires (conditions désaturées assurées par la ventilation de l'entreposage). En situation de stockage, des évents peuvent être aménagés en partie haute du corps pour que l'hydrogène diffuse dans les zones ventilées en alvéole,
- moyens de manutention identiques pour l'entreposage et le stockage.



Démonstrateur de colis de stockage B

3.3 L'alvéole de stockage B

3.3.1 Description de l'alvéole

L'alvéole de stockage proposée par l'Andra est un tunnel borgne horizontal d'une longueur utile de 250 m et d'un diamètre excavé de 12 m. L'alvéole est orientée parallèlement à la pression horizontale des terrains la plus forte (contrainte géomécanique principale majeure) pour minimiser l'endommagement de la roche lors du creusement. La forme quasi-circulaire, ou en fer à cheval, de l'excavation s'adapte au mieux aux différentes dimensions des colis et minimise les excavations et les volumes de béton. Le dimensionnement du revêtement de l'alvéole vise à garantir la stabilité mécanique de l'ouvrage pendant plusieurs siècles.



Alvéole de stockage de déchets B en configuration d'exploitation

L'alvéole de stockage pour les déchets B comporte :

- une chambre de stockage, le corps, irradiante et inaccessible au personnel, de forme rectangulaire, de 4 à 7 m de côté selon la taille des colis. Les colis y sont disposés sur 3 ou 4 niveaux et sur 2 à 4 colonnes dans le sens transverse de l'alvéole. Pour la manutention et la ventilation, des jeux limités (10 à 15 cm) sont laissés entre le haut des colis et le toit de l'alvéole, ainsi qu'entre les colonnes de colis et entre les colis et les parois verticales de l'alvéole,
- une tête (environ 13 m de long) équipée, pour assurer la radioprotection du personnel, d'un sas constitué par un système de doubles portes. La hotte de transfert des colis de stockage est accostée sur la porte externe du sas dans lequel est stationné un chariot élévateur téléopéré qui extrait le colis de la hotte et le conduit dans la chambre de stockage.

La galerie d'accès à l'alvéole est conçue pour accueillir un scellement – constitué d'un noyau en argile gonflante de très faible perméabilité (inférieure à 10⁻¹¹m/s) et de massifs d'appuis en béton – qui ferme l'alvéole lorsque le choix en est fait. Pour favoriser la performance du scellement, le diamètre utile de la galerie est réduit à 5 ou 6 m selon les colis, et son soutènement, comme son revêtement, sont conçus de manière à limiter les perturbations mécaniques.

Le dimensionnement et la stabilité de l'alvéole B

La stabilité de l'alvéole et la limitation de la perturbation mécanique du terrain peuvent être assurées par divers composants qui agissent à des échelles de temps différentes : le soutènement assurant la sécurité du chantier de construction de l'alvéole, le revêtement garantissant la stabilité de l'ouvrage pendant une durée au moins séculaire. Ce dernier est constitué d'un anneau de béton et d'un remplissage qui permet de constituer une chambre de stockage rectangulaire ajustée à la géométrie des colis empilés.

• Le soutènement, posé au fur et à mesure du creusement de l'alvéole, est constitué par un grillage, des boulons courts et 25 cm d'épaisseur de béton projeté.

• L'anneau de revêtement de l'alvéole travaille uniquement en compression et ne nécessite pas d'être armé, ce qui favorise la durabilité. Il est constitué d'une épaisseur de 70 cm (en voûte) de béton haute performance (BHP 60 MPa).

• Le béton de remplissage limite à moins de 5 % les vides résiduels entre colis tout en maintenant un jeu fonctionnel (décimétrique) entre les colis pendant une durée au moins séculaire, pour les besoins d'une gestion réversible du stockage.

Par ailleurs, la stabilité de l'alvéole en cas de séisme a été vérifiée. Cet aspect n'est pas dimensionnant.

Des perturbations chimiques limitées

Matériaux

Si le béton (pH de l'ordre de 12) contribue à créer un environnement physico-chimique favorable à la protection à long terme des colis de stockage et des éléments métalliques des colis primaires, il induit cependant des phénomènes d'interaction béton-argilites susceptibles de dégrader les propriétés de rétention de ces dernières. L'extension des perturbations chimiques a été évaluée : elle est limitée à quelques décimètres. L'introduction de grandes quantités de béton n'a donc pas d'impact sur les propriétés d'ensemble des argilites situées au-dessus et au-dessous du stockage (épaisseur supérieure à 50 m).

Ventilation

L'apport d'air sec dans les alvéoles induit une désaturation du béton de revêtement et de la roche en paroi, et favorise l'oxydation des matériaux et des argilites proches de la paroi du revêtement. Les études montrent que cette oxydation reste limitée à une très faible épaisseur (d'ordre décimétrique) de roche en paroi et n'a pas d'impact sur les propriétés de rétention de la roche saine.

L'apport d'oxygène peut aussi provoquer l'oxydation des matériaux métalliques présents dans l'alvéole : celle-ci est toutefois très limitée par l'état relativement sec de l'air.

La plupart des colis B dégagent de l'hydrogène en faible quantité et des traces de radionucléides gazeux. La ventilation des alvéoles vise à réduire l'accumulation d'hydrogène et à limiter la contamination des matériels et matériaux par les radionucléides gazeux. Pendant l'exploitation et jusqu'à leur fermeture, les alvéoles de déchets B sont ventilées en permanence. Les débits de dégagement d'hydrogène sont si faibles que l'on peut envisager sans risque des arrêts de ventilation de plusieurs semaines.

3.3.2 La construction des alvéoles B

Le mode de construction envisagé comporte trois phases successives :

- le creusement du corps de l'alvéole et de la galerie d'entrée, qui peut être réalisé par une machine à attaque ponctuelle de grande puissance. Ce mode de creusement perturbe peu la roche et apparaît bien adapté aux caractéristiques des argilites et à la géométrie de l'alvéole. L'abattage de la section de l'alvéole peut se faire en deux passes : la partie supérieure puis la partie inférieure ; celle de la galerie d'entrée, de plus faible diamètre, en une seule passe,
- la pose immédiate du soutènement qui assure la sécurité du chantier. Pour le corps de l'alvéole, le soutènement étudié est un boulonnage court (boulons scellés avec un coulis de ciment) accompagné de béton projeté sur un treillis. Le soutènement par cintres métalliques, quoique possible, a été écarté à ce stade car il introduirait une plus grande quantité d'acier,
- la pose du revêtement qui garantit la stabilité de l'ouvrage sur plusieurs siècles. Pour le corps de l'alvéole, le revêtement est un béton coulé en place. Des voussoirs en béton préfabriqués ont été écartés car ils pourraient conduire à une quantité d'acier importante (armatures) et seraient difficiles à poser en deux passes de creusement. Le béton du revêtement et de remplissage peut in fine être coulé dans des coffrages métalliques articulés.



Creusement et soutènement d'une alvéole B

À l'étranger

Les concepts étudiés à l'étranger pour le stockage des déchets de type B ou assimilés dans des roches sédimentaires sont assez similaires. Les colis primaires sont regroupés dans des colis de stockage, le plus souvent parallélépipédiques, et les alvéoles sont des excavations de dimension assez grande (jusqu'à 10 ou 15 m) déterminée par le comportement mécanique de la roche-hôte. Le concept de la Nagra est le plus comparable à celui de l'Andra et s'explique par la similitude des caractéristiques géotechniques de la roche-hôte. *La différence notable entre les concepts étrangers et celui de l'Andra réside dans le choix de combler les vides entre colis* dans l'alvéole (sauf le concept du WIPP, mais la roche salifère a des propriétés de comportement différé permettant de combler ces vides à moyen terme). Dans le cas du concept Andra, il a été retenu de ne pas combler ces vides, ce qui facilite la réversibilité, mais de les limiter au maximum par conception.

• En Suisse (Nagra), la faisabilité d'un stockage souterrain est étudiée dans une argilite semblable à celle du Callovo-Oxfordien par sa minéralogie et ses propriétés mécaniques. Les colis de stockage sont empilés sur 2 ou 3 niveaux dans des tunnels de 9 m de haut et 7 m de large. Une fois les colis en place, les vides résiduels sont comblés par un mortier de ciment. L'alvéole est fermée par un bouchon en béton et un scellement argileux est prévu à l'entrée de la zone de déchets B.

• Au Japon (JNC), le concept retenu pour un site sédimentaire générique est un tunnel de section circulaire de 10 m de diamètre utile avec un revêtement en béton de 60 cm d'épaisseur (soit une section excavée de 11,2 m). Les colis primaires sont regroupés dans des colis de stockage. Pour les déchets les plus irradiants, une barrière ouvragée (1,2 m d'épaisseur) constituée de bentonite (argile gonflante) et de sable est placée entre les colis et le revêtement. Pour les déchets faiblement irradiants, il n'y a pas de barrière ouvragée. Les vides restant dans l'alvéole sont comblés par un matériau de remplissage de type mortier ou ciment.

• En Belgique (Ondraf), le concept (aujourd'hui en cours de révision) consiste à empiler les colis de déchets dans des galeries de 3 à 6 m de diamètre puis à combler les vides entre les fûts avec du béton ou un matériau similaire. Ce concept résulte en particulier des propriétés de la roche-hôte de Boom, plus argileuse et beaucoup plus plastique que les argilites du Callovo-Oxfordien.

• Aux Etats-Unis (US-DOE), le Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), installation de stockage opérationnelle dédiée aux déchets militaires transuraniens, est construite à 650 m de profondeur dans une formation salifère. Les colis de déchets de type CH (Contact Handled ou colis peu irradiants) sont empilés dans des chambres rectangulaires (4 à 5 m de haut, 10 à 15 m de large). Aucun remplissage des vides n'est réalisé.

• En Allemagne (DBE), des études sont en cours pour concevoir un stockage de déchets radioactifs qui ne dégagent pas de chaleur dans une couche marno-calcaire sur le site de l'ancienne mine de fer de Konrad (Basse-Saxe). Les colis primaires sont regroupés dans des colis de stockage cylindriques ou parallélépipédiques, puis empilés par chariot élévateur sur 3 niveaux dans des chambres existantes (éventuellement élargies et/ou allongées) ou dans de nouvelles chambres larges de 7 m et hautes de 6 m. Leur longueur peut atteindre 1000 m. Après remplissage de 50 m d'alvéole, un mur en béton est érigé pour isoler ce tronçon dont les vides sont comblés par un matériau cimentaire.

Fonctions	Période	Revêtement béton	Section des alvéoles	Scellement dans la galerie d'accès	Sas d'entrée des alvéoles
Transférer les colis jusqu'à leur emplacement de stockage	Exploitation		х		
Soutenir mécaniquement les ouvrages	Exploitation et observation	х	х		
Protéger les personnes contre l'irradiation	Exploitation et observation				Х
Permettre de récupérer les colis de stockage	Exploitation et observation	X	X		
S'opposer à la circulation d'eau	Après fermeture			Х	
Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Après fermeture	х		х	
Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Après fermeture			х	
Limiter les déformations mécaniques dans les argilites du Callovo-Oxfordien	Après fermeture	x	х		
Fractionner le stockage	Après fermeture			Х	

Fonctions et principaux composants de l'alvéole B

Légende :

X composant essentiel dans la réalisation du ne fonction x contribution d'un composant à une fonction

3.3.3 La mise en alvéole des colis de stockage de déchets B

La conception proposée conduit à quatre étapes pour la mise en alvéole du colis de stockage, qui pourraient être réalisées de façon semi-automatique sous le contrôle d'un opérateur :

- accostage de la hotte sur le sas et extraction du colis : après son transport dans les galeries, la hotte de protection est accostée au niveau de la tête de l'alvéole, assurant ainsi la protection radiologique des personnes présentes dans la galerie. Après ouverture des portes extérieures du sas, le chariot de manutention s'avance pour extraire le colis hors de la hotte. Une fois le colis extrait, les portes du sas sont refermées et la hotte peut repartir à vide,
- rotation et orientation du chariot de manutention : le plancher mobile du sas fait subir au chariot de manutention chargé du colis une rotation de 180°, puis le translate latéralement pour le présenter face à la rangée de stockage voulue,
- transfert et mise en place des colis : les portes intérieures du sas sont ouvertes pour laisser passer le chariot de manutention dans la chambre de stockage. Le colis est transporté en position basse pour éviter tout risque de chute et garantir la stabilité du chariot. Arrivé au niveau du front des colis déjà stockés, le chariot s'arrête, soulève le colis à la hauteur de son niveau de dépose et le met en place,

- retour du chariot de manutention : le chariot se repositionne en marche arrière dans le sas en attente d'un nouveau cycle. Les portes intérieures du sas sont refermées.

Un retrait des colis s'effectuerait de manière identique par simple inversion du processus.



Synoptique de mise en alvéole des colis B

Manutention : un chariot élévateur mobile électrique

La manutention de colis lourds (6 à 25 tonnes) empilés sur plusieurs hauteurs et rangés dans une alvéole de 250 m de long nécessite un engin mobile téléopéré capable de déplacer la charge longitudinalement, latéralement et en hauteur, et de réaliser une rotation de 180° pour passer de la position « face à la hotte » à la position « face à l'alvéole ». Son encombrement réduit (4 m) limite le volume de la tête d'alvéole non utilisé pour le stockage et facilite ses évolutions pour extraire le colis de la hotte et procéder à la mise en alvéole.



Stockage des colis en alvéole B

4. Les colis et les alvéoles de déchets C

Après avoir étudié l'alternative entre un stockage en l'état des colis primaires de déchets C et l'ajout de conteneurs de stockage, l'Andra a, comme pour les déchets B, privilégié la seconde option, avec toutefois des motivations différentes.

La conception des alvéoles et l'architecture générale des zones de stockage C visent à répondre aux différentes fonctions d'exploitation et de sûreté à long terme. En particulier, la gestion du dégagement thermique des déchets et les exigences de la sûreté à long terme (protection des colis pour limiter le relâchement des radionucléides, fractionnement et réversibilité du stockage) apparaissent comme étant des éléments dimensionnants.

4.1 Les besoins

4.1.1 Interdire l'arrivée d'eau sur le verre pendant la phase thermique

La haute activité β - γ des déchets C vitrifiés se traduit par un dégagement thermique important qui diminue dans le temps, avec la décroissance radioactive des isotopes qui en sont la cause. L'exothermicité des déchets C induit une augmentation de la température dans le stockage qui est susceptible de :

- augmenter l'altérabilité du verre (où sont piégés les radionucléides) dont les constituants, notamment la silice, se dissolvent progressivement au contact de l'eau ou dont la forme chimique évolue pour former un gel à la surface du verre, ce qui conduit à un relâchement des radionucléides,
- modifier le comportement des radionucléides qui seraient relâchés dans l'eau après altération du verre par l'eau. Une température supérieure à 50 °C accroît les incertitudes sur le comportement des radionucléides en solution et accélère la vitesse de diffusion des espèces chimiques.

L'Andra a choisi en conséquence d'interdire l'arrivée d'eau sur le verre, sur une durée de plusieurs milliers d'années, par l'ajout d'un conteneur au colis primaire de déchets C pour :

- éviter le risque d'un percement par corrosion au contact de l'eau du conteneur primaire en acier inoxydable, qui pourrait intervenir à l'échelle de quelques dizaines d'années, et d'une dissémination de radionucléides qui rendraient plus délicate une récupération des colis (gestion réversible),
- empêcher une altération précoce du verre, accélérée par la température, qui serait accompagnée d'un relâchement de radionucléides (sûreté).

La durée d'étanchéité du conteneur est plus longue que la phase thermique des déchets C, c'est-à-dire la période suivant la mise en stockage des déchets pendant laquelle la température au cœur du verre est supérieure à 50 °C.

Durée de la phase thermique : différents paramètres

Pour un colis type donné, la durée de la phase thermique dépend de trois paramètres :

- *l'âge du déchet lors de sa mise en stockage :* la puissance thermique des colis primaires de déchets C dépend de la nature du colis et diminue dans le temps avec la décroissance radioactive ;
- la température maximale retenue dans le stockage : l'Andra a retenu une température maximale de 100 °C au niveau du colis de stockage et de 90 °C au contact de la roche. Le respect de ce critère détermine la conception des alvéoles de stockage (nombre de colis stockés par alvéole, distance entre alvéoles voisines...);
- l'architecture modulaire de la zone de stockage : les alvéoles de stockage sont organisées par sous-ensembles (fractionnement du stockage et progressivité de sa construction). Pour déterminer l'évolution de la température dans une alvéole au-delà de 300 ans, il faut ajouter les flux de chaleur provenant d'alvéoles éloignées aux effets locaux. En effet, la chaleur dégagée par un colis se diffuse progressivement.

L'évaluation de la durée de la phase thermique repose sur des simulations à l'échelle de chaque alvéole, de quelques alvéoles voisines et de l'ensemble de la zone de stockage (voir chapitre 6).

4.1.2 Gérer le dégagement thermique

En stockage, la hausse de température due au dégagement thermique des déchets (qui diminue dans le temps selon la période radioactive des radionucléides) peut engendrer des processus couplés complexes pour des températures supérieures à 100 °C dans la roche. Elle pourrait aussi provoquer des transformations minéralogiques irréversibles de l'argilite du Callovo-Oxfordien si de trop fortes températures étaient atteintes sur de trop longues durées. Il faut donc faire en sorte que la puissance thermique reçue par l'argilite demeure limitée afin de ne pas entraîner de transformation minéralogique. Les études sur le comportement des argilites ont montré qu'une sollicitation de 70 °C sur 10 000 ans n'induit pas, ou très peu, de transformations irréversibles. Pour rester dans un domaine de fonctionnement où les phénomènes sont connus et réduire ainsi l'endommagement de l'argilite, l'objectif est de *limiter les températures de l'argilite à ces valeurs*. Concrètement, le dimensionnement thermique des alvéoles et l'architecture de la zone de stockage C visent à limiter la température à 90 °C au contact de l'alvéole de stockage et des argilites, et à assurer le retour à une température inférieure à 70 °C au sein du milieu géologique en bordure d'alvéole, avant mille ans, ce qui assure une marge de sûreté vis-à-vis des effets thermiques.

4.1.3 Assurer la sûreté à long terme après fermeture

Pour réaliser les fonctions de sûreté à long terme, la conception et les méthodes de réalisation des alvéoles cherchent à :

- protéger les colis de stockage. Un premier objectif est de maintenir un environnement physico-chimique favorable à la durabilité impartie au surconteneur, donc de maîtriser la corrosion. Pour réduire la durée de la période où la vitesse de corrosion est la plus rapide (corrosion aqueuse en conditions oxydantes), il faut empêcher une réalimentation de l'alvéole en air (et en oxygène) à partir de la galerie d'accès ventilée. L'alvéole doit aussi, après dégradation du surconteneur et retour de l'eau au contact du verre, maintenir des conditions favorables à une faible vitesse de dissolution du verre et de relâchement des radionucléides par le verre. Un autre objectif est donc de limiter, après fermeture de l'alvéole, le renouvellement d'eau au contact direct du verre. Il faut également limiter, après dégradation de l'enveloppe des colis, les écoulements d'eau (vecteur de transport des radionucléides relâchés par les colis) hors de l'alvéole. A long terme, après resaturation, cette limitation repose sur la faible perméabilité de l'argilite et sur la fermeture hydraulique de l'alvéole par un scellement,
- limiter les déformations mécaniques dans le milieu en réduisant les vides résiduels dans les alvéoles et dans le colis de stockage pour éviter que leur résorption à terme, suite à l'altération des matériaux, n'induise des déformations endommageant les argilites,
- maîtriser les perturbations physico-chimiques : le conteneur de stockage vise à interdire l'arrivée d'eau sur le colis primaire et à éviter une altération prématurée du verre durant la phase thermique. Il faut aussi s'assurer

que les matériaux du conteneur n'induisent pas de perturbations excessives sur le verre et son environnement à plus long terme, notamment sur le pH de l'eau que l'on cherche à maintenir entre 7 et 9 à cause de la sensibilité de la dissolution du verre à ce paramètre.

Trois phases de corrosion

- L'évolution de l'alvéole comporte trois phases de corrosion :
- conditions oxydantes (air occlus) sèches n'entraînant presque pas de corrosion,
- *puis corrosion aqueuse en conditions oxydantes* qui se traduit par une vitesse de corrosion de l'acier (concentrée en tête d'alvéole) de plusieurs dizaines de microns par an. Cette phase est très limitée dans le temps,
- enfin corrosion en conditions anoxiques et réductrices où la vitesse de corrosion de l'acier se réduit à quelques microns (voire moins d'un micron) par an.

4.1.4 Garantir la réversibilité et permettre le retrait des colis

L'objectif est de préserver la possibilité, sur une durée au moins séculaire, de retirer les colis, d'intervenir dans l'exploitation et la fermeture du stockage et de modifier sa conception.

La possibilité de retrait des colis requiert essentiellement le « maintien en état » des colis de stockage et de la géométrie des ouvrages. La durabilité mécanique et géométrique des composants entourant les colis (chemisage de l'alvéole) doit être assurée en regard de la corrosion et de l'augmentation de la pression exercée par l'argilite. Cela implique de :

- limiter la corrosion, en réduisant la durée de la période de corrosion aqueuse en conditions oxydantes où la vitesse de corrosion est élevée,
- préserver un jeu fonctionnel autour des colis de stockage dans l'alvéole, dimensionné au plus juste pour ne pas induire d'endommagement de l'argilite à terme avec la résorption des vides.

Par ailleurs, la modularité de l'architecture apporte de la flexibilité dans la gestion du stockage.

4.2 Le conteneur de stockage C

4.2.1 Description du conteneur

L'Andra a retenu l'option d'un conteneur individuel abritant un seul colis primaire de déchets C, cylindrique et en acier non allié.

• Un conteneur individuel offre une grande souplesse pour la conception des alvéoles (en particulier leur dimensionnement thermique) et la gestion des colis. Il minimise les dimensions des objets à manutentionner, ce qui est possible compte tenu de la standardisation des colis primaires.

• L'acier non allié (P235) présente deux avantages qui limitent le risque que des défauts ne dégradent l'étanchéité et la durabilité du conteneur, notamment au niveau des soudures :

- ce type de matériau a un comportement robuste et ses processus de corrosion sont bien maîtrisés. Vis-à-vis de la corrosion aqueuse, les résultats expérimentaux et les modélisations montrent que la corrosion généralisée est le mécanisme dominant à moyen et long terme, et que sa vitesse peut être quantifiée sur la base de modèles validés expérimentalement. Les analogues archéologiques en fer datant de plus de 2 000 ans soutiennent l'évaluation des processus de corrosion et fournissent un repère temporel par rapport à la durabilité des aciers sur une échelle de temps significative. Par ailleurs, les modèles de corrosion des aciers non alliés sont peu sensibles à la chimie des eaux, de sorte qu'ils exigent une précision moindre sur les conditions d'environnement chimique (ils sont en particulier compatibles avec les incertitudes sur la composition des eaux insterstitielles du Callovo-Oxfordien), sur la composition du métal et son état structural et surfacique,
- sa mise en œuvre (métallurgie, soudabilité, contrôle) s'appuie sur des technologies industriellement éprouvées.
 L'Andra a retenu l'acier non allié P235 car il offre de bonnes propriétés de soudabilité et présente les caractéristiques mécaniques suffisantes vis-à-vis du dimensionnement pour les colis de stockage.

Le conteneur de déchets C

Le conteneur de colis C comporte un corps en acier non allié P235 équipé de patins en céramique et un couvercle en acier non allié P235 (soudé sur le corps par faisceau d'électrons) qui répondent au besoin d'étanchéité.

• Le corps est constitué d'une enveloppe (55 mm d'épaisseur utile) offrant un confinement pendant 4000 ans, sur la base de modèles conservatifs, retenant notamment comme hypothèses un amorçage de la corrosion dès la mise en place dans le stockage, puis une corrosion en milieu oxydant durant une dizaine d'années. Il est doté d'aménagements intérieurs qui limitent les vides et, à l'extérieur, de patins de glissement en céramique permettant sa manutention dans l'alvéole de stockage par une technique de poussage. Ils évitent le frottement direct acier/acier entre le colis et le chemisage de l'alvéole qui risquerait d'endommager le colis pendant son transfert, facilitent le glissement et limitent ainsi les efforts de poussée.

• Le couvercle a une épaisseur utile de 55 mm. Sa forme interne adaptée au profil supérieur du colis primaire participe à la limitation des taux de vide. A l'extérieur, une gorge usinée permet la préhension verticale et horizontale du conteneur à l'aide d'un grappin ; elle est dimensionnée pour laisser une place suffisante au déploiement des doigts du grappin même en cas de corrosion (pour son retrait éventuel dans le cadre de la réversibilité).



Principe du surconteneur de déchets C

Etudes d'autres matériaux métalliques

L'Andra a étudié d'autres matériaux métalliques pour le conteneur : métaux (cuivre, titane) ou alliages passivables (grâce à la formation en surface d'une fine couche corrodée protégeant le métal) à base de chrome, nickel, molybdène, peu sensibles à la corrosion et utilisables en faible épaisseur. Les études sur les alliages passivables ont montré une plus grande sensibilité à l'environnement d'un stockage (conditions hyperoxydantes, température, présence d'espèces agressives comme les

chlorures...) et l'éventualité d'une corrosion par piqûration. De plus, comme les métaux nobles, ils requièrent des techniques de mise en œuvre innovantes pour constituer une enveloppe étanche. L'Andra ne les a pas retenus, mais maintient une veille active concernant les travaux effectués sur ces alliages.

Une tenue à la chute compatible avec les moyens d'exploitation retenus

Les calculs de tenue du colis à la chute sont effectués pour une hauteur de 1,60 m correspondant approximativement à la hauteur maximum à laquelle les colis sont manipulés dans les installations de surface. La chute (angle 45 °) se fait sur une cible infiniment rigide, telle que toutes les déformations se situent sur le conteneur et non sur la cible. Les résultats de calcul montrent que la zone d'impact du conteneur subit une déformation plastique (léger aplatissement) de l'ordre de 20%, très localisée. Le reste du conteneur ne se déforme pas. En conclusion, le dimensionnement issu de la corrosion et de la tenue mécanique à une pression de 12 MPa (qui correspond approximativement au poids des terrains après retour à l'équilibre mécanique) confère au conteneur une résistance à une hauteur de chute compatible avec les moyens d'exploitation envisagés.

4.2.2 La fabrication du conteneur C

De même que pour les colis de déchets B, la fabrication du colis de déchets C peut s'effectuer en deux phases. Le corps du conteneur et son couvercle sont préfabriqués. Pour le corps, on a privilégié la réalisation du corps du conteneur et du fond en une seule pièce par une technique éprouvée industriellement qui est celle du perçage et étirage à chaud d'un bloc d'acier massif (cavité obtenue par déformation du métal). La fabrication du colis de stockage est réalisée en cellules blindées sur le site de stockage : chargement du colis primaire de déchets vitrifiés dans le conteneur, pose et soudage du couvercle par la technique du faisceau d'électrons, contrôle de la soudure avant transfert vers les alvéoles de stockage.

Le soudage sous vide par faisceau d'électrons (FE)

L'Andra a étudié plusieurs procédés de soudage du couvercle :

- soudage avec métal d'apport autour de plusieurs procédés : Laser/YAG utilisé pour l'acier de faible épaisseur, mais encore en développement pour le soudage de fortes épaisseurs d'acier, procédés TIG (Electrode de Tungstène avec Gaz Inerte), MIG, MAG (Electrode de Métal avec Gaz Inerte ou Actif) dont les temps de soudage ne sont cependant pas adaptés aux pièces de fortes épaisseurs,
- soudage sans métal d'apport autour des procédés FE (faisceau d'électrons) et friction. Ce dernier, en cours de développement en Suède par SKB pour le soudage de conteneurs en cuivre de 50 mm d'épaisseur, n'est pas directement transposable au soudage de fortes épaisseurs d'acier.

L'Andra a privilégié à ce stade le soudage sous vide par faisceau d'électrons (FE) qui présente les avantages suivants :

- procédé sans métal d'apport (favorable à une application en cellule blindée),
- procédé éprouvé industriellement sur des aciers de fortes épaisseurs (jusqu'à 200 mm),
- faible zone affectée thermiquement par la soudure,
- faible risque de fissuration à froid (soudage sous vide),
- procédé automatisable,
- soudage réalisé en une seule passe (vitesse de soudage élevée) et productivité élevée (soudage 5 à 10 fois plus rapide que les procédés TIG et MIG).

Compte tenu de l'analogie avec le conteneur envisagé pour les combustibles usés, les qualifications du procédé de soudage par faisceau d'électrons et des procédés de contrôle associés sont effectuées en 2004-2005 dans le cadre d'un programme de démonstration Andra/EDF/CEA avec la fabrication des deux démonstrateurs de conteneurs de stockage de colis CU en vraie grandeur. Deux tronçons de tubes sont spécialement réalisés pour qualifier ces procédés.

4.3 L'alvéole de déchets C

4.3.1 Description

L'alvéole de stockage pour déchets C proposée par l'Andra est un tunnel borgne (0,7 m de diamètre, 40 m de longueur totale) revêtu d'un chemisage métallique. Sa longueur a été limitée pour faciliter la démonstration de faisabilité technologique (creusement, mise en place des colis). L'alvéole peut accueillir de 6 à 20 colis selon leur puissance thermique. Les colis dégageant le plus de chaleur sont séparés par des intercalaires. La chaleur est évacuée par conduction passive dans la formation géologique : aucune ventilation n'est sollicitée. L'alvéole est desservie par une galerie d'accès.

Pour réduire l'extension de la zone d'argilite susceptible d'être fracturée par la construction, les alvéoles sont orientées parallèlement à la contrainte géomécanique principale majeure. Leur espacement est défini pour limiter la température dans le milieu géologique à moins de 90 °C. Elles sont implantées perpendiculairement aux galeries d'accès et regroupées en modules. A sa fermeture, chaque module (qui regroupe environ 400 alvéoles) est séparé des autres par des scellements.



Alvéole de stockage de déchets C en configuration d'exploitation

L'alvéole de stockage pour les déchets C comprend une partie utile (ou corps) dédiée au stockage des colis et une tête qui accueille le scellement de fermeture de l'alvéole.

• Le corps (30 m de long) est constitué d'un chemisage métallique où sont stockés les colis. Le chemisage permet leur mise en place par glissement et répond au besoin de réversibilité. Son épaisseur (25 mm) permet de préserver les jeux fonctionnels internes, facilite le retrait éventuel des colis et confère à l'ouvrage une durabilité à une échelle de temps séculaire. Pour maintenir un environnement chimique favorable, il est en acier noir au carbone, d'une nuance voisine de celle des colis de stockage évitant des phénomènes de corrosion galvanique.

A l'intérieur du chemisage métallique, les colis fortement exothermiques sont séparés par des intercalaires qui limitent la température. Ces intercalaires favorisent la dissipation de la chaleur par conduction dans la roche et permettent de réduire le nombre d'alvéoles nécessaires.

• La tête de l'alvéole (8 m de long) est dotée pendant la période d'exploitation d'un chemisage provisoire pour la mise en place des colis. Elle est obturée pendant son exploitation par une porte en acier de forte épaisseur, l'operculaire, où s'accoste la hotte de transport des colis de stockage, et qui assure la protection radiologique du personnel présent dans la galerie d'accès à l'alvéole. L'extraction du colis de la hotte et sa mise en alvéole sont assurées par un robot pousseur intégré à l'enceinte blindée de la hotte. Après le remplissage de l'alvéole et dans l'attente de sa fermeture, l'operculaire peut être démonté pour être réutilisé sur d'autres alvéoles ; un capot de protection est alors mis en place afin de limiter les échanges d'air avec la galerie d'accès, et donc la vitesse de corrosion (limitation de la durée de la phase de corrosion aqueuse oxydante).

Lorsque la fermeture est décidée, le tronçon de *chemisage occupant la tête de l'alvéole peut être retiré et la tête accueille le scellement de l'alvéole.* Il est constitué de trois éléments : un bouchon de protection radiologique en acier, un bouchon d'argile gonflante de très faible perméabilité (inférieure à 10⁻¹¹m/s), un bouchon d'appui en béton.

Un dimensionnement géotechnique conduisant à une très faible zone endommagée

Les calculs géotechniques montrent que, pour une alvéole située à 500 m de profondeur et orientée parallèlement à la contrainte géomécanique principale majeure :

- aucune zone fracturée ne se forme lors de la construction,
- la zone micro-fissurée ne s'étend pas au-delà de 0,5 fois le rayon de l'alvéole, soit 20 cm environ.

Une alvéole de déchets C dotée de son bouchon définitif (scellement) constitue ainsi un système hydraulique et chimique fermé.

Le dimensionnement thermique de l'alvéole

La chaleur produite par les colis de déchets est évacuée uniquement par conduction passive dans la formation géologique (pas de ventilation). Pour que la température limite (90 °C dans la roche) ne soit pas dépassée, les paramètres géométriques des modules sont ajustés à la puissance thermique des colis lors de leur mise en stockage, puissance qui décroît avec l'âge des colis. Ce dimensionnement prend aussi en compte le besoin de compacité (volume total excavé le plus petit possible). Ainsi, la distance entre deux alvéoles adjacentes (entraxe) varie de 8,5 à 13,5 m et le nombre de colis par alvéole de 6 à 22.

Modules pour colis de stockage	C0 AVM	C0 R7/T7	C1	C2	C3	C4
Age (ans): durée d'entreposage préalable des colis	20	20	60	60	70	70
Nombre de colis/alvéole de 30 m de longueur utile	22	18	8	7	7	6
Entraxe entre alvéoles (mètres)	8,5	8,5	12	11	13,5	13
Pas entre colis (mètres)	0	0	2,4	3,1	3,1	4,0

Un acier assez épais pour le chemisage

Maintenir l'intégrité de la structure de l'alvéole et de la galerie d'entrée ainsi que des jeux fonctionnels pendant une durée pluriséculaire au regard d'un éventuel retrait des colis requiert une épaisseur suffisante du chemisage de l'alvéole et de bonnes performances du revêtement béton de la galerie. L'intégrité du chemisage peut en effet être affectée par :

- le fluage de l'argilite qui comblera le vide annulaire à l'extrados du chemisage et comprimera ce dernier,
- la dilatation du terrain et celle de l'acier (dues à la température des colis) qui, pendant les premières décennies, créeront des compressions. Celles-ci diminueront avec la décroissance radioactive des colis,
- la corrosion de l'acier du chemisage à une vitesse de l'ordre de 1 à 2 mm/siècle.

L'épaisseur du chemisage a été calculée de manière conservatrice à 25 mm pour un acier non allié en tenant compte d'une réserve de corrosion de 5 mm et d'une épaisseur de 20 mm pour pouvoir résister à une pression isostatique de 12 MPa.

4.3.2 La construction de l'alvéole C

La préservation de l'intégrité de la formation géologique dans les terrains proches de l'alvéole est le critère essentiel de choix de la méthode de construction. A cet effet, le chemisage est mis en place le plus tôt possible lors de la construction.

• Le creusement : la technique du forage horizontal peut être utilisée. La foration de l'alvéole est réalisée par un outil qui découpe la roche dans un diamètre voisin du diamètre extérieur du chemisage et qui est suivi dans sa progression par un tube assurant la tenue de la roche.

• La mise en place du chemisage permanent, simultanément au creusement, limite les perturbations dans le terrain et supprime le risque de déstabilisation des parois. Les éléments de chemisage soudés les uns aux autres sont poussés (ils ne tournent pas dans le terrain) par un pousse-tube monté sur la foreuse. Les éléments de tube du chemisage peuvent être assemblés par soudage automatique, procédé fiable et industriellement éprouvé (pose de pipe-lines). Le fond du chemisage est obturé par soudage d'une plaque métallique, à l'aide d'un robot.



Séquence de creusement d'une alvéole C

La technique du forage

La rotation de l'outil de coupe est réalisée par un moteur restant dans la galerie de manutention (sur la foreuse) ; un train de tiges transmet cette rotation et la poussée sur l'outil de coupe. A l'inverse, le moteur de rotation du micro-tunnelier, autre technique envisageable, pénètre dans l'excavation et suit la roue de coupe. La poussée sur l'outil est transmise par un tube en général laissé en place pour servir de chemisage.

Une variante d'alvéole avec barrière ouvragée

La solution de référence retenue pour le stockage des colis C est « sans barrière ouvragée » argileuse : le chemisage est au contact direct du terrain. En effet, les études ont montré :

- l'absence de formation de zone fracturée autour de l'alvéole à 500 m de profondeur,
- la création d'une zone microfissurée de faible extension dont la perméabilité ne modifie pas les conditions de transport diffusives dans le champ proche autour de l'alvéole,
- une évolution à long terme de nature à refermer la microfissuration autour de l'alvéole (phénomènes de fluage sur appui et de colmatage).

Les incertitudes sur les caractéristiques géotechniques, les modèles rhéologiques ou l'évolution à long terme avant la mise en appui, peuvent conduire à l'apparition d'une zone fracturée dans l'argilite autour de l'alvéole, qui serait en tout état de cause limitée à une très faible épaisseur (quelques cm).

A titre de précaution, l'Andra a étudié une variante avec barrière ouvragée argileuse dont la fonction principale serait de constituer une barrière diffusive qui renforcerait la protection des colis de l'altération aqueuse. Dans la solution de référence, cette fonction est assurée par l'argilite. Le recours à une barrière ouvragée ne serait nécessaire que si les caractéristiques hydrauliques de l'argilite en champ proche autour de l'alvéole (zone endommagée) étaient dégradées de manière significative, ce qui n'est a priori pas le cas.

A l'étranger

Les concepts belge, japonais et suisse pour le stockage des déchets vitrifiés en terrains argileux présentent des traits communs avec celui de l'Andra. On note le *recours à un surconteneur en acier*. Ils reposent presque tous sur une *séparation des colis* pour des raisons thermiques. Pour minimiser l'espace occupé, le *stockage horizontal est préféré au vertical*.

Toutefois, selon la durée de vie allouée au surconteneur et les modes de corrosion, l'épaisseur et la nature de l'acier (noir ou inox) varient ; le fractionnement en sous-ensembles borgnes proposé par l'Andra n'est pas toujours considéré par les projets étrangers.

• En Belgique (Ondraf), le concept présenté dans le dossier SAFIR 2 de 2001 en milieu argileux (argile assez tendre, à 200 m de profondeur) retient un surconteneur en inox pour les colis primaires. Les colis de stockage sont introduits dans un chemisage en inox, centré dans une galerie circulaire (2,4 m de diamètre) et sont entourés d'une barrière ouvragée de 80 cm d'épaisseur constituée de blocs préfabriqués d'argile gonflante (mélangée à du sable et du graphite). Un revêtement en béton (25 cm d'épaisseur) assure le soutènement du terrain. Les galeries qui accueillent les colis sont débouchantes ou aveugles ; la mise en place des colis nécessite de les translater au maximum sur 200 m dans le chemisage en inox. Des concepts alternatifs ont été envisagés et sont en cours d'étude.

• Au Japon (JNC), le concept décrit dans le rapport H12 (1999) couvre divers contextes géologiques et envisage deux options principales : des alvéoles verticales (environ 4 m de hauteur et 2,2 m de diamètre) avec un seul colis, des tunnels de stockage horizontaux (2,2 m de diamètre, hors revêtement éventuel) contenant plusieurs colis séparés de quelques mètres. Le colis primaire est protégé par un surconteneur en acier noir. Une barrière ouvragée (30 à 70 cm d'épaisseur selon la géologie et la résistance du surconteneur), constituée de blocs préfabriqués d'argile gonflante avec 30 % de sable, est interposée entre le colis de stockage et le terrain.

• En Suisse (Nagra), le concept de stockage en site argileux (argile assez raide à 600 m de profondeur) présenté dans le *Project Opalinus Clay, Technical report 02-05* (2002) propose un surconteneur en acier noir très épais (25 cm), d'une durée de vie recherchée de 10000 ans. Les colis de stockage sont déposés sur des plots en argile gonflante compactée, dans une galerie de stockage dotée d'un revêtement. La distance entre colis adjacents est de 3 m. Les vides entre et autour des colis sont comblés par de l'argile gonflante pulvérulente, faiblement compactée en place.

Fonctions	Période	Chemisage métallique	Bouchon et operculaire métalliques	Bouchon d'alvéole	Intercalaires
Transférer les colis jusqu'à leur emplacement de stockage	Exploitation	х			
Soutenir mécaniquement les ouvrages	Exploitation et observation	х			
Protéger les personnes contre l'irradiation	Exploitation et observation		х	х	
Permettre de récupérer les colis de stockage	Exploitation et observation	Х	x		
S'opposer à la circulation d'eau	Après fermeture			х	
Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Après fermeture	x		х	
Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Après fermeture			x	
Limiter les déformations mécaniques dans les argilites du Callovo-Oxfordien	Après fermeture	х		х	x
Dissiper la chaleur	Toutes	Х			X
Fractionner le stockage	Après fermeture				

Fonctions et principaux composants de l'alvéole C

Légende :

X composant essentiel dans la réalisation d'une fonction x contribution d'un composant à une fonction

4.3.3 La mise en alvéole des colis de stockage de déchets C

La conception proposée conduit à quatre étapes pour la mise en alvéole du colis de stockage, qui pourraient être réalisées de façon semi-automatique sous le contrôle d'un opérateur :

- accostage de la hotte au niveau de l'operculaire en tête d'alvéole. Mécaniquement accouplées lors des opérations d'accostage, les portes de la hotte et de l'operculaire s'ouvrent simultanément, assurant ainsi la protection radiologique des personnels présents dans la galerie,
- introduction du robot mobile pousseur et du colis dans le chemisage de l'alvéole,
- mise en place du colis dans l'alvéole par poussage au moyen du robot pousseur,
- retour du robot dans la hotte, fermeture des portes de la hotte et de l'operculaire.

Le processus peut être inversé pour retirer les colis stockés.



Illustration du principe de fonctionnement du robot pousseur

Le robot mobile pousseur

La mise en alvéole de colis cylindriques (2 tonnes, diamètre de 0,6 m environ, longueur de 1,3 à 1,6 m) dans une alvéole horizontale de section circulaire nécessite un engin téléopéré capable d'être logé dans l'enceinte blindée de la hotte et de transférer le colis jusqu'à sa position finale avec un jeu fonctionnel colis/alvéole aussi réduit que possible.

L'Andra a examiné trois solutions :

- *le transfert du colis par coussins d'air* qui a fait l'objet d'un essai de faisabilité concluant en Suède, mais avec une charge d'un diamètre très supérieur (1,8 m) à celui des colis de stockage C,
- *le transfert du colis par un robot porteur autopropulsé* qui augmenterait le gabarit et le poids de la hotte de protection et nécessite encore des développements,
- le transfert du colis par un robot pousseur autopropulsé à vérins de type pas à pas, solution retenue par l'Andra. Ce dispositif, simple et robuste, est bien adapté à la masse des colis C et minimise le jeu entre le colis et le chemisage de l'alvéole. Il est testé dans le cadre du projet européen ESDRED (projet européen d'études sur les technologies du stockage piloté par l'Andra dans le cadre du VI^e Programme cadre de recherche et développement de l'Union européenne).

Entièrement hydraulique, pour allier dimension réduite et forte puissance, le robot pousseur (1,3 m de long, 0,55 m de diamètre) est constitué d'une structure octogonale équipée de galets de roulement et de vérins hydrauliques. Tandis qu'il pousse le colis dans l'alvéole grâce à son vérin longitudinal, le robot est immobilisé et bloqué contre le chemisage de l'alvéole grâce à ses mâchoires latérales qui se déploient. Il est relié à la hotte par des flexibles d'alimentation hydraulique et un câble de rappel permettant de repositionner le robot dans la hotte après mise en place du colis.

131

5. Le stockage de combustibles usés

Le stockage direct de combustibles usés (CU) pourrait être envisagé, s'ils venaient à ne pas être traités. Un conteneur pour le stockage direct a été étudié par l'Andra pour les combustibles usés issus des réacteurs à eau pressurisés d'EDF (combustibles UOX, URE, MOX).

La conception de l'alvéole de stockage CU renvoie, quant à elle, à des problématiques similaires à celles de l'alvéole de déchets C : gérer la dissipation de la chaleur produite par les combustibles usés en respectant des critères de température analogues, créer un environnement favorable aux colis de déchets et permettre une gestion réversible. Cependant, certaines spécificités des combustibles usés, comme leur dégagement thermique plus intense et durable dans le temps, ont conduit à proposer des dispositions conceptuelles différentes, notamment l'interposition d'une barrière ouvragée en argile gonflante entre le colis de stockage et les argilites.

5.1 Le conteneur pour les assemblages combustibles usés

Les assemblages combustibles UOX (oxyde d'uranium) et MOX (oxydes mixtes d'uranium et de plutonium) issus des réacteurs d'EDF ont *une puissance thermique résiduelle élevée qui décroît lentement*. Comme pour les déchets C, l'Andra a défini un conteneur *visant à interdire l'arrivée d'eau au contact des assemblages combustibles pendant la phase thermique et à contribuer ainsi à limiter l'effet de la température sur la physico-chimie des radionucléides dans le milieu géologique. L'Andra a choisi de fixer la durée minimale d'étanchéité à l'eau du conteneur de CU à 10000 ans.*

Le conteneur proposé est cylindrique et en acier non allié (P235). Il est constitué d'un corps et d'un couvercle soudés par faisceau d'électrons.

Le nombre d'assemblages par conteneur est fixé à quatre combustibles de type UOX (CU1) pour limiter la charge thermique du colis de stockage et pour la manutention. Pour les combustibles MOX (CU2) et certains UOX, un seul assemblage est placé par conteneur en raison de leur puissance thermique ou du risque de criticité.

Comme pour les conteneurs C, l'épaisseur de l'acier détermine la durée d'étanchéité. Sur la base d'un modèle pénalisant de corrosion généralisée, l'épaisseur du conteneur a été fixée pour satisfaire le besoin de maintien du confinement pendant au moins 10 000 ans (110 mm pour le conteneur à quatre assemblages, 120 mm pour le conteneur à un assemblage).

Dans le conteneur à quatre assemblages, un insert interne massif (en fonte) maintient un espacement entre les quatre assemblages combustibles : cette disposition garantit la sous-criticité, améliore le transfert thermique dans le colis et assure la tenue mécanique du colis à la pression externe. Dans le conteneur à un seul assemblage, la tenue mécanique du colis est assurée par l'enveloppe, prévue plus épaisse.

Le colis à quatre assemblages (UOX)

• Le corps est constitué d'une virole (enveloppe) cylindrique en acier au carbone P235 (épaisseur utile 110 mm) et d'un fond rapporté soudé de même épaisseur utile et même matériau.

• Un insert en fonte (épaisseur minimale d'environ 45 mm) doté de quatre logements (pour chacun des assemblages combustible UOX) est coulé à l'intérieur du corps.

• Son couvercle est en acier P235 dont l'épaisseur totale est de 280 mm : 110 mm sont alloués à la corrosion et le reste est prévu pour la tenue mécanique, le talon de soudage et la création d'un interface de manutention analogue à celui des colis C, mais de plus grande dimension. Il est soudé au corps par faisceau d'électrons (FE), comme pour le colis C constitué du même matériau.

La solution à quatre assemblages UOX par conteneur permet de traiter environ 98% de l'inventaire quantitatif des combustibles usés UOX pris en compte dans les études.



Colis de stockage de grand diamètre, 4 assemblages UOX ou URE

Un risque de criticité maîtrisé

Les combustibles usés contiennent une masse de matière fissile résiduelle qui nécessite de prendre en compte le risque de sûreté-criticité. En sortie de réacteur, un combustible UOX contient 10 kg de matière fissile résiduelle dont 4 à 5 kg d'uranium 235 et près de 4 kg de plutonium 239. Un combustible MOX contient 20 kg de matière fissile résiduelle dont 16 kg de plutonium (dont 12 de plutonium 239). Les études ont conduit à limiter la concentration de la matière fissile, donc le nombre d'assemblages, dans le conteneur de stockage. Les colis de stockage sont dimensionnés pour assurer individuellement des conditions sous-critiques.

L'évaluation du risque de criticité a porté sur toutes les phases de la vie du conteneur, en particulier le très long terme, en prenant en compte l'évolution des masses de matières fissiles, des géométries et des matériaux du colis et de son environnement. Les études ont montré que le risque de criticité peut être maîtrisé.

Des démonstrateurs de conteneurs (à quatre assemblages) ont été réalisés en 2004-2005 dans le cadre d'un programme tripartite Andra/CEA/EDF : l'enveloppe (virole) des conteneurs a été obtenue par forgeage d'un bloc d'acier, l'insert en fonte a été directement coulé dans l'enveloppe en acier. Le fond et le couvercle ont ensuite été rapportés et soudés par la technique du faisceau d'électrons.

La mise en place des conteneurs de CU de grand diamètre (à quatre assemblages) dans les alvéoles de stockage peut se faire au moyen d'un dispositif dédié, de type aéroporteur : le colis est soulevé par des cellules à coussin d'air fixées sur un berceau qui est lui-même poussé par un chariot autopropulsé. Ce principe a été testé avec succès par SKB en Suède et le dispositif fait l'objet d'essais dans le cadre du projet européen ESDRED.

La mise en place des conteneurs de petit diamètre (à un assemblage) peut se faire, quant à elle, selon le même procédé que celui utilisé pour les colis de déchets C (diamètre voisin).

Compatibilité avec les options d'entreposage industriel et de longue durée



Pour assurer la compatibilité du conteneur avec les entreposages industriels et l'entreposage longue durée (ELD) développé par le CEA, et offrir une flexibilité maximale de gestion, les assemblages combustibles issus des REP d'EDF (correspondant aux colis type CU1 et CU2) peuvent être pris en compte dans leur version « nus » ou dans leur version « préconditionnés », en étui individuel cylindrique, définie par l'étude d'ELD du CEA. Deux variantes de conteneur sont donc proposées : l'une avec des logements de section carrée pour l'accueil d'assemblages nus, l'autre avec des logements cylindriques pour l'accueil d'assemblage mis en étui.

5.2 Des alvéoles conçues pour gérer le dégagement thermique et contribuer aux fonctions de sûreté à long terme

La maîtrise du relâchement des radionucléides, après dégradation du conteneur, repose essentiellement sur l'existence d'une barrière diffusive (matériaux homogènes, peu perméables et aux coefficients de diffusion aussi faibles que possible) permettant à l'alvéole de fonctionner en système chimique quasi-fermé. La faible solubilité de certains éléments constitutifs des assemblages et le maintien sur place des espèces dissoutes limitent en effet l'altération des combustibles et immobilisent au mieux les radionucléides dans l'alvéole.

Les argilites, par leur très faible perméabilité, imposent un environnement favorable à la protection des colis. Toutefois, contrairement à la solution de référence proposée pour les déchets C, l'Andra a retenu d'interposer une barrière ouvragée en argile gonflante entre roche et colis, compte tenu des caractéristiques des combustibles usés (quantités d'actinides) qui induisent une décroissance thermique plus lente et la possibilité d'effets thermo-hydro-mécaniques à long terme sur les argilites en champ proche.

La barrière ouvragée en argile gonflante

Une perméabilité aussi faible et une conductivité thermique aussi élevée que possible : telles sont les propriétés attendues de la barrière ouvragée argileuse.

La faible perméabilité vise à créer un milieu diffusif autour des colis. Les études ont montré qu'une perméabilité de l'ordre de 10⁻¹³ m/s est accessible à petite échelle, sachant que l'objectif visé à l'échelle de l'ouvrage peut se satisfaire d'une perméabilité de 10⁻¹¹ m/s.

La conductivité thermique permet de dissiper la chaleur dégagée par les déchets. Les études ont montré qu'il est possible d'atteindre une conductivité supérieure à 1,5 W/m/°C sur le long terme (matériau saturé) et supérieure à 1,2 W/m/°C lors du pic thermique (matériau non saturé).

La formulation du matériau de barrière ouvragée (densité sèche) doit permettre le développement d'une pression de gonflement suffisante (entre 0,5 et 7 MPa) pour résorber les vides de construction dans l'alvéole et assurer une pression de gonflement résiduelle pour le maintien à long terme d'une faible perméabilité.

Pour obtenir les propriétés recherchées, les caractéristiques suivantes sont envisagées :

- mélange d'argile gonflante (environ 70%) et de sable pour améliorer la conductivité thermique (environ 30%),
- choix d'une argile de type « MX80 » ou équivalent (faible perméabilité, même à faible densité),
- densité sèche d'environ 1,6 pour l'argile et degré de saturation à la mise en place d'environ 80 %.

L'alvéole de stockage proposée est un tunnel borgne d'environ 2,5 m (colis type CU2) à 3 m (colis type CU1) de diamètre et de 45 m de longueur totale, doté d'un soutènement métallique à l'intérieur duquel se trouve la barrière ouvragée en argile gonflante. A l'intérieur de celle-ci, un chemisage métallique reçoit les colis. Comme dans les alvéoles C, la chaleur produite par les colis est évacuée par conduction passive dans la formation géologique. Le dimensionnement thermique a conduit à définir les distances séparant deux alvéoles adjacentes et le nombre de colis de stockage par alvéole, et à séparer ces derniers par des intercalaires.

Les alvéoles sont regroupées en modules dédiés à chaque type de colis (CU1 et CU2).

L'alvéole comporte deux parties.

• La partie utile (corps) d'environ 35 m de longueur est, de la roche vers l'intérieur, équipée :

- d'un soutènement métallique constitué de viroles en acier d'environ 25 à 30 mm d'épaisseur, qui constitue le tube de poussée lors du creusement, protège le personnel lors de la construction et supporte les anneaux de barrière ouvragée⁷,
- *d'une barrière ouvragée* de 0,80 m d'épaisseur constituée d'anneaux préfabriqués d'argile gonflante et de sable. Sa fonction principale est de constituer un milieu exclusivement diffusif qui intervient lorsque le conteneur de combustibles usés atteint sa fin de vie,
- *d'un chemisage métallique* accueillant trois à quatre colis (selon leur puissance thermique) séparés par des intercalaires.



Coupe longitudinale d'une alvéole CU

• La tête de l'alvéole (10 m de long) est constituée d'un chemisage provisoire permettant la mise en place des colis. Lorsque la fermeture est décidée, ce chemisage est enlevé après pose d'un bouchon métallique de protection biologique, puis un noyau d'argile gonflante est introduit dans les anneaux de barrière ouvragée et un bouchon de béton est coulé pour assurer un appui mécanique.

L'alvéole peut être creusée au moyen d'un micro-tunnelier.

7 Il est perforé pour permettre la resaturation de la barrière ouvragée située en son sein.

A l'étranger

Le stockage direct de combustibles usés est l'option retenue pour la gestion de l'aval du cycle électronucléaire par les Etats-Unis, la Suède et le Finlande. En Suisse et en Belgique, le stockage direct a aussi été étudié comme une option possible.

Le concept de l'Andra *comme ceux de tous les projets étrangers en milieu saturé* (à l'exception du projet américain de Yucca Mountain) *repose sur l'utilisation d'une barrière ouvragée en argile gonflante* mise en place à la construction de l'alvéole (concepts belge, suédois et finlandais), ou après la mise en stockage du colis (ce qui évite le recours à un chemisage métallique mais conduit à mélanger des opérations de type « génie civil » et de manipulation de matières nucléaires irradiantes).

• Les concepts suédois (SKB) et finlandais (POSIVA) sont conçus pour des terrains granitiques. Les assemblages sont placés, par 4 ou 12, dans un conteneur en cuivre (environ 1 m de diamètre, 50 mm d'épaisseur) équipé d'un insert en fonte. Les alvéoles sont des puits verticaux de 1,75 m de diamètre (KBS3-V), accueillant un seul conteneur entouré et surmonté d'argile gonflante. SKB et POSIVA étudient aussi une variante horizontale (KBS-3H) avec l'utilisation d'un superconteneur (en cuivre entouré d'une barrière ouvragée en argile gonflante préfabriquée) mis en place dans des galeries de stockage de plusieurs centaines de mètres de long. Cette variante est avant tout motivée par une réduction du linéaire de galeries d'accès.

• Le projet américain de Yucca Mountain (US/DOE) est dédié aux combustibles usés civils et de défense. La formation géologique est un tuf volcanique. Les alvéoles de stockage sont des galeries horizontales passantes (5,5 m de diamètre, 970 m de long) où sont placés les colis à la file, sans barrière ouvragée, mais en position surélevée et sous un « bouclier-parapluie » en titane pour les protéger des percolations locales (eaux météoriques) et de la corrosion localisée. A la différence des autres projets, la chaleur produite par les colis est évacuée par une ventilation qui balaye toutes les galeries de stockage.

• Le concept belge (Ondraf) est présenté, dans le rapport SAFIR 2 de 2001 comme une adaptation de celui pour déchets C. Le colis de stockage est un conteneur en acier inox de 9,5 mm d'épaisseur accueillant un seul assemblage dans un étui pour des raisons de criticité. Les alvéoles sont des tunnels horizontaux (2,7 m de diamètre, 600 à 800 m de long) dotées d'un revêtement en béton (25 cm d'épaisseur) et équipées de quatre tubes longitudinaux espacés par de l'argile gonflante. Les colis sont, selon leur puissance thermique, mis en place dans ces tubes en file (MOX) ou par quatre dans la section (UOX). Les critères thermiques de dimensionnement sont une température inférieure à 100 °C en paroi de conteneur et une élévation de température de l'aquifère de couverture inférieure à 6 °C.

• En Suisse (Nagra), un concept similaire à celui des déchets C est envisagé. Les assemblages CU sont placés, par 4 ou 9 (selon qu'ils sont issus de réacteurs PWR ou BWR), dans un conteneur en acier (environ 1 m de diamètre, 150 mm d'épaisseur) dimensionné pour une durabilité de 1 000 à 10 000 ans. Une variante, d'une durabilité accrue, considère un conteneur en cuivre avec insert en acier ou en céramique. Les alvéoles (2,5 m de diamètre, plusieurs centaines de mètres de long) sont horizontales et orientées selon la contrainte majeure. Elles n'ont pas de revêtement : seulement un soutènement par grillage et boulons par sécurité. Les alvéoles sont passantes (dotées d'une entrée et d'une sortie, par opposition à une alvéole en cul-de-sac). Les colis de stockage sont posés sur des plots en argile gonflante compactée. L'espace annulaire compris entre le colis et les parois de l'alvéole est rempli, au fur et à mesure de la mise en place des colis, par projection de bentonite sous forme d'un matériau granulaire compacté *in situ*.

6. Les puits et les galeries d'accès

Les puits et galeries d'accès aux alvéoles de stockage permettent d'acheminer le personnel, les matériels et matériaux nécessaires à la construction des ouvrages, ainsi que les colis de stockage pour leur transfert jusqu'aux alvéoles. Ils servent aussi à passer les réseaux (eau, alimentation électrique, communication, etc.) et assurent la ventilation, élément essentiel de la maîtrise des conditions d'hygiène et de sécurité.



Section longitudinale du puits de transfert des colis

6.1 Des puits pour la liaison entre la surface et le fond

Pour accéder aux installations souterraines de stockage, deux types d'ouvrages, couramment employés dans l'industrie minière, peuvent être envisagés : les puits, ouvrages verticaux équipés d'une machinerie pour descendre et monter des charges dans des cages suspendues à des câbles, ou les descenderies, galeries inclinées (pente inférieure à 15 %) parcourues par des véhicules sur pneumatiques. Il faut toutefois noter que, dans les installations minières, les descenderies sont généralement associées à des puits.

La solution proposée par l'Andra est une option « tous puits » retenue pour sa simplicité (un seul type d'ouvrage) et les plus grandes possibilités d'adaptation des puits à des flux importants.

Pour gérer en toute sûreté la coexistence des différents types d'activités, *les puits sont spécialisés par fonctions*. Leur nombre peut être de quatre :

- un puits (diamètre utile de 12 m environ) est exclusivement affecté au transfert des colis. Il est équipé d'une cage, d'environ 110 tonnes de charge utile, pour la descente ou la remontée des colis et des hottes de protection. D'autres équipements, largement éprouvés dans l'industrie minière (système de poulie à friction, système antichute) confèrent au système une très grande fiabilité. En outre, des dispositions techniques particulières permettraient de limiter les conséquences d'une chute éventuelle : système de freinage et amortisseur de chute, puits équipé de sas et d'un système de ventilation indépendant pouvant être couplé à un système de filtration de très haute efficacité,
- deux puits assurent les autres transferts : l'un (diamètre utile 11 m environ) celui du personnel ; l'autre (diamètre utile 6 m environ), dit de service, celui des matériaux et gros matériels (déblais, équipements lourds, béton, véhicules miniers, etc.). Ces deux puits assurent en outre l'entrée d'air,
- un puits (diamètre utile 10 m environ) de ventilation est dédié aux retours d'air : retour d'air général (travaux et exploitation), retour d'air susceptible d'être contaminé en cas d'incident (air provenant du puits de descente des colis), évacuation des fumées en cas d'incendie.



Représentation de la partie basse du puits, transfert des colis avec le système amortisseur de chute

La descenderie en variante

De nombreuses mines sont équipées à la fois de puits et de descenderies (galeries inclinées avec des pentes de 10 à 15 % en général) dont l'usage s'est répandu avec le développement des engins miniers diesel et des convoyeurs à bande.

La descenderie ne dépend pas, comme un puits, d'un équipement unique, très fiable, mais à l'entretien contraignant ; elle est aussi plus souple d'exploitation car elle peut être empruntée sans rupture de charge par des véhicules très divers. Les flux y sont cependant plus limités et les risques d'incidents plus élevés. Certains facteurs sont plus favorables à la descenderie qu'à un puits : bonne qualité des terrains de recouvrement, faible profondeur, flux de matériaux limités, utilisation de matériels encombrants, gisement et topographie complexes.

Dans le cas de l'étude de faisabilité du stockage sur le site de Meuse/Haute-Marne, les terrains de recouvrement, peu aquifères, ont de bonnes caractéristiques mécaniques, la profondeur (500 m) est élevée pour une descenderie, mais pas sans précédents. La géométrie de la couche et la topographie sont simples, les flux de colis sont limités en nombre de mouvements et constitués de charges encombrantes et lourdes, les flux de matériaux sont importants pour le creusement des zones C et CU, mais faibles pour les zones B et CO.

Hormis la fonction de retour d'air, où la descenderie n'a aucun intérêt, la comparaison n'est pas très tranchée entre les deux types d'accès. L'Andra a étudié deux types de descenderies :

- une descenderie de service (diamètre utile de 6 à 8 m) conçue pour faciliter la circulation des engins et envisageable en remplacement du puits de service pour la construction et l'exploitation des zones B et C0. Elle se compose de huit tronçons droits de 340 m de long et de 15 % de pente, reliés par des demi-cercles de 10 % de pente et de 30 m de rayon. Une cheminée facilite la ventilation et le désenfumage de l'ouvrage pendant sa construction et son utilisation. Des garages permettent le croisement des engins,
- une descenderie pour la descente de colis conçue pour limiter la vitesse d'impact en cas de perte de contrôle du véhicule de transport des colis. Cette galerie hélicoïdale (diamètre utile 7 m, pente de 10 %) élimine les risques de chute sur une grande hauteur. Chaque spire, de forme carrée, comporte des tronçons droits (80 m de long) et des courbes (10 m de rayon intérieur). A chaque virage, une échappatoire permet d'arrêter l'engin en cas de dérive éventuelle. Une cheminée relie les spires et assure un circuit d'air spécifique à la descenderie, indépendant de la ventilation du stockage. L'ouvrage est équipé d'une piste en béton et de réseaux d'alimentation électrique, de transmission, etc. Des engins électriques similaires aux véhicules de transport des colis dans le stockage et dotés de systèmes de freinage redondants assurent la descente des colis et la remontée des hottes.

A l'étranger

Au WIPP (installation de stockage de déchets radioactifs transuraniens exploitée aux Etats-Unis) et pour le projet de Gorleben (Allemagne), l'option retenue est « tous puits », à des profondeurs respectives de 650 et 900 m, dans des terrains sédimentaires, la couche-hôte étant du sel. La Suède et la Finlande envisagent des solutions mixtes combinant puits et descenderie, à 500 m de profondeur dans le granite.

6.2 Un réseau de galeries structuré pour les transferts souterrains

Le réseau de galeries et d'infrastructures souterraines est conçu pour la gestion d'une coactivité, c'est-à-dire la coexistence dans le temps des activités de construction et d'exploitation, et assurer une flexibilité de la construction, de l'exploitation et de la fermeture du stockage. Il satisfait les exigences de sécurité et de sûreté opérationnelle et assure notamment l'évacuation du personnel et l'accès rapide des équipes de secours si nécessaire, ainsi que l'évacuation des fumées en cas d'incendie, afin de limiter au maximum l'étendue de la zone enfumée.

Plusieurs dispositions sont proposées :

- les galeries d'accès sont hiérarchisées en galeries principales reliant les puits aux zones de stockage et en galeries secondaires reliant les zones de stockage aux galeries d'accès principales. Elles sont regroupées en faisceaux de galeries parallèles. Les galeries d'un même faisceau sont reliées par des galeries perpendiculaires, les recoupes, pour le passage d'une galerie à une autre en cas d'accident (évacuation du personnel, passage des véhicules de secours),
- les galeries d'accès sont spécialisées par fonction pour séparer les transports des colis des autres flux :
 - les galeries de transfert des colis servent au transport des colis et hottes entre le puits de transfert et les galeries d'accès aux alvéoles, et assurent l'amenée d'air frais en pleine section dans les modules de stockage en exploitation,
 - les galeries de travaux, équipées de pistes pour engins sur pneus ou de voies ferrées, sont dédiées aux autres transports (circulation des engins de travaux, transports du personnel, matériaux et matériels, extraction des déblais, etc.). Elles assurent aussi l'amenée d'air frais en pleine section dans les zones de travaux,
 - *les galeries de ventilation* assurent le retour d'air provenant des chantiers de creusement et d'exploitation vers le puits de ventilation. Le retour d'air peut aussi se faire dans des gaines dédiées mises en place dans les autres galeries.

Les flux dimensionnant les galeries

Au stade actuel des études, on a privilégié des galeries de diamètre relativement réduit (ce qui conduit à prévoir des galeries de ventilation dédiées) mais en plus grand nombre, par rapport à des galeries de grand diamètre (pour placer dans chaque galerie une gaine de ventilation ou de désenfumage). Les galeries d'accès sont dimensionnées par les flux (engins, ventilation) qui les traversent et avec le souci de limiter leur diamètre :

- le gabarit et le nombre des engins transportant matériaux, matériels et personnels (dimension minimale pour permettre le passage d'un engin, nécessité éventuelle d'assurer le croisement d'engins circulant en sens inverse, présence éventuelle de piétons),
- les flux de ventilation qui se traduisent, selon les besoins en ventilation, par des sections minimales pour le passage de l'air. L'air frais est amené en pleine section par les galeries de transfert des colis et de travaux, et le retour d'air se fait par des gaines ou des galeries de ventilation dédiées. Le désenfumage se fait par des gaines spécifiques. La vitesse de l'air dans les galeries est limitée par des considérations d'hygiène et de sécurité dans les galeries où le personnel circule et travaille.

Un changement du rythme de construction et d'exploitation du stockage pourrait modifier le rythme des travaux de creusement, de mise en stockage des colis et, en conséquence, l'architecture et le dimensionnement des galeries. Les infrastructures ont été étudiées sous des hypothèses conventionnelles de rythme de construction et d'exploitation afin d'en évaluer la faisabilité. Elles peuvent être adaptées à un rythme différent, moyennant un ajustement de la capacité des infrastructures.

7. Les installations de surface

Les installations de surface permettent d'accueillir les colis de déchets primaires, acheminés dans des emballages de transport par convoi routier ou ferroviaire depuis leurs sites de production ou d'entreposage, puis de préparer les colis de stockage pour leur transfert dans les installations souterraines. Elles apportent aussi le soutien nécessaire à la construction et au fonctionnement des installations souterraines.

Les installations de surface peuvent se répartir en quatre zones d'activités principales :

- *une zone nucléaire (environ 25 ha)* où les colis primaires sont réceptionnés et entreposés temporairement, puis préparés en colis de stockage ; ces activités sont similaires à celles de certaines installations nucléaires industrielles comme le centre de retraitement COGEMA de La Hague ou l'entreposage hollandais COVRA,
- *une zone industrielle* (environ 35 ha) qui regroupe des ateliers techniques et des stockages de matériaux nécessaires aux travaux souterrains,
- une zone administrative (environ 20 ha) regroupant les bureaux, autres bâtiments, parkings,
- une verse (environ 120 ha pour le scénario S1a) où sont stockés les déblais de creusement ; si des combustibles usés étaient stockés, la verse aurait une emprise supérieure du fait de travaux de creusement plus importants. Une partie de ces déblais sera utilisée comme matériaux de remblais des installations souterraines.

Contrôles de non-contamination

Des contrôles systématiques de non contamination surfacique sont effectués sur chaque emballage à sa réception, sur chaque colis primaire lors de son déchargement hors de l'emballage et sur chaque colis de stockage avant sa mise en hotte. En cas de dépassement significatif du seuil autorisé (4 Bq/cm² pour les émetteurs bêta et gamma, 0,4 Bq/cm² pour les émetteurs alpha), les colis primaires pourraient être entreposés provisoirement avant d'être renvoyés chez le producteur.





L'exploitation réversible du stockage

p.145 > 1. Les activités mises en œuvre dans les installations de stockage

p.154 > 2. La fermeture réversible des ouvrages souterrains

L'exploitation réversible du stockage

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

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

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

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

La réversibilité est aussi rendue possible par la connaissance de l'évolution de l'état des ouvrages et la définition de moyens d'actions : l'Andra a étudié des dispositions opérationnelles pour la gestion du stockage, notamment la reprise des colis, ainsi que des moyens d'observation qui pourraient être implantés dans les ouvrages.

Une exploitation progressive et sur une longue durée

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

5

1. Les activités mises en œuvre dans les installations de stockage

1.1 Les différentes activités

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

1.1.1 La construction progressive

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

1.1.2 L'exploitation nucléaire

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



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

1.1.3 La fermeture des ouvrages

A la différence d'un entreposage, un stockage réversible peut être rendu passif, c'est-à-dire constituer un système robuste et sûr à long terme, ne nécessitant pas d'intervention humaine. A cet effet, les différents ouvrages souterrains peuvent être fermés.

La fermeture consiste ainsi, dans le cadre d'un processus par étapes successives souscrivant à l'exigence de réversibilité, à mettre en place les différents scellements prévus dans la conception (bouchon d'argile gonflante au niveau des alvéoles et des galeries) et à remblayer les galeries en utilisant l'argilite de la formation géologique extraite lors du creusement.

1.1.4 Les activités connexes : surveillance, observation, maintenance

La surveillance vise à contrôler la maîtrise de la sûreté, en particulier pour protéger les personnes (conditions de travail) et l'environnement durant la phase d'exploitation.

En complément des mesures de surveillance, l'observation a pour objectif de suivre le comportement du stockage, en appréhendant les phénomènes et en suivant leur évolution, afin de fournir des éléments scientifiques et techniques pour fonder la gestion réversible du stockage et aider à la prise de décision. Surveillance et observation sont étroitement liées et renvoient à une même motivation : augmenter la confiance dans le processus de stockage et sa maîtrise.

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

La gestion de la co-activité dans les installations souterraines

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

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



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

1.2 La sûreté opérationnelle

Les activités industrielles dans les installations de surface et souterraines du stockage impliquent de mettre en œuvre des dispositions de sûreté opérationnelle très comparables aux pratiques habituelles des installations nucléaires : protections physiques, consignes, systèmes de détection et d'alarme, moyens d'intervention, procédures et contrôles, mais aussi formation et sensibilisation du personnel. Ces dispositions visent à :

- prévenir les risques conventionnels (incendie, accidents de manutention et de circulation, chutes de blocs, risques électriques...),
- confiner les matières radioactives, limiter les rejets de radionucléides gazeux et contrôler la contamination,
- protéger les opérateurs et le public de l'irradiation (écrans de protection, éloignement des opérateurs vis-à-vis des sources...),
- éviter un accident de criticité.

L'Andra a recensé les situations potentiellement dangereuses pendant la construction et l'exploitation du stockage ainsi qu'après la fermeture réversible des installations. La vraisemblance de leur apparition et la gravité de leurs conséquences ont été ensuite estimées de manière qualitative. Enfin, des mesures de prévention, de protection et de contrôle ont été définies. Cette analyse de risque a été menée en liaison avec

les études de conception du stockage.

Une évaluation préliminaire a estimé l'efficacité des mesures vis-à-vis des risques d'exposition radiologique et des risques liés aux émissions de gaz nocifs par les colis. L'Andra a aussi procédé à des études plus détaillées de certains risques (par exemple, incendie dans les installations souterraines et chute de colis en puits) compte tenu de leurs conséquences potentielles et de leur caractère dimensionnant pour les installations.

1.2.1 Les résultats de l'évaluation dosimétrique en fonctionnement normal

En fonctionnement normal du stockage, les résultats de l'évaluation dosimétrique montrent que, compte tenu des mesures prises dans la conception proposée des installations et de leur mode d'exploitation, *les doses d'exposition reçues sont inférieures aux limites que s'est fixées l'Andra (5 mSv/an pour les travailleurs soumis à un suivi régulier et 0,25 mSv pour le public) et très inférieures aux limites réglementaires actuelles (20 mSv/an pour les travailleurs, 1 mSv/an pour le public).*

Pour les travailleurs, les doses les plus importantes, comprises entre 2 et 4 mSv/an, seraient associées aux opérations de réception des colis primaires, de transfert et de mise en alvéole des colis de stockage ainsi qu'à la surveillance et à la maintenance des installations. Les valeurs associées aux autres activités seraient inférieures à 2 mSv/an. Ces résultats préliminaires ne tiennent pas compte d'une démarche ultérieure d'optimisation de la radioprotection.

Pour le public en limite de site (à 500 m des installations de surface), l'exposition externe est nulle compte tenu de la distance avec les installations nucléaires de surface. L'impact des gaz radioactifs rejetés dans l'atmosphère est estimé de manière conservative. Les estimations majorantes aboutissent à une dose (0,001 mSv/an) qui serait négligeable par rapport à la limite réglementaire (1 mSv/an).

1.2.2. Les résultats de l'évaluation du risque lié à l'émission de gaz non radioactifs par les colis

Certains colis de déchets B (B2 et B5.1) émettent des gaz non radioactifs (hydrogène principalement et méthane) qui, en cas de trop forte concentration dans l'air, peuvent provoquer une explosion moyennant ignition. Deux mesures préviennent ce risque : une ventilation suffisante des locaux de surface et des galeries souterraines pour diluer ces gaz, et l'utilisation, pour ces catégories de déchets, de colis de stockage dotés d'un couvercle poreux ou d'évents pour éviter un risque d'accumulation d'hydrogène dans les colis et évacuer ces gaz.

L'évaluation a conclu que les débits de ventilation envisagés suffisaient à une bonne maîtrise de ces risques durant l'exploitation, même en cas d'arrêt temporaire.

Les phases postérieures à la fermeture des alvéoles ne présentent pas non plus de risque. En cas de retour dans une alvéole scellée, une ventilation serait rétablie pour évacuer les gaz accumulés dans l'alvéole.

Certains colis de déchets B (colis B2 de boues bitumées) émettent aussi du monoxyde de carbone (CO) et du gaz carbonique (CO₂). Là encore, la ventilation des locaux et des galeries est dimensionnée pour assurer une dilution suffisante de ces gaz qui, en outre, sont produits en quantité minime.

Le risque thermique : un risque mineur pour le personnel d'exploitation

Les dégagements de chaleur des colis de stockage C et CU n'induisent pas de risque thermique pour les personnes pendant leur entreposage et leur transfert en hotte car l'élévation de température sur la paroi externe de la hotte est limitée à 15 °C maximum par rapport à la température ambiante. Ce risque est également mineur dans les installations souterraines ; la chaleur dégagée par ces colis dans les alvéoles s'évacuera à travers les terrains et dans les galeries par la ventilation.

1.2.3 L'étude des risques liés à une situation accidentelle (incendie, chute de colis, chute de cage en puits)

L'analyse a mis en exergue plusieurs risques qui ont fait l'objet d'études particulières compte tenu de leurs spécificités (risques liés au contexte souterrain et nucléaire) ou de leur influence sur la conception du stockage et de ses équipements.

1.2.3.1 L'étude du risque d'incendie dans les installations souterraines

Le risque d'incendie affectant le matériel

L'incendie d'un engin porteur d'une hotte chargée d'un colis, durant la phase de transfert entre la surface et l'alvéole de stockage, ou du chariot de levage a été étudié. Il n'affecterait pas l'intégrité du colis de déchets transporté qui bénéficie d'une double protection : la hotte de transport qui assure, outre une protection radiologique, un rôle d'écran thermique et le colis de stockage. Il n'y a donc pas de risque de dissémination de matière radioactive en cas d'incendie. L'Andra a porté une attention particulière au risque d'incendie dans les installations souterraines, à sa prévention, à sa détection, aux moyens de protection, et a développé des études complémentaires pour s'assurer que les solutions préconisées pour la conception et l'exploitation des installations autoriseraient, le cas échéant, l'évacuation des personnes dans des conditions de sécurité satisfaisantes.

Les simulations montrent que la conception du stockage, avec des faisceaux de galeries parallèles reliées à intervalles réguliers par des galeries de jonction (recoupes), permettrait aux personnes de s'éloigner du lieu de l'incendie, de rejoindre rapidement une galerie parallèle alimentée en air frais (hors du circuit des fumées) et de regagner la surface dans de bonnes conditions. Pour le cas particulier d'un incendie se développant en phase de travaux dans une galerie en cul-de-sac, les personnes qui ne pourraient rejoindre une recoupe pour évacuer pourraient s'abriter dans un refuge mobile, résistant au feu, étanche aux fumées et équipé des utilités nécessaires (eau, air comprimé...) pour y attendre le personnel d'intervention.

1.2.3.2 L'étude des conséquences de la chute d'un colis B lors de sa mise en alvéole

Les colis B sont mis en alvéole par un engin commandé à distance par un opérateur situé hors de l'alvéole. De nombreuses mesures permettent de prévenir la chute d'un colis lors de sa mise en alvéole : contrôle du cycle de mise en stockage, choix d'un chariot de levage très stable, dimensionnement mécanique des colis de stockage... L'Andra a toutefois analysé un scénario accidentel : celui de la chute d'un colis placé dans l'alvéole au plus haut niveau de la pile de colis, soit une hauteur maximale de 4 à 6 m. Ce scénario couvre l'ensemble des opérations de manutention dans les installations du stockage.

Les simulations ont montré que la chute du colis de stockage pourrait provoquer une détérioration mécanique (fissure) de celui-ci mais que, même dans l'hypothèse la plus défavorable (chute du colis de stockage sur un coin), l'intégrité du colis primaire et sa capacité de confinement étaient préservées.

1.2.3.3 L'étude de la chute de la cage en puits chargée d'une hotte de transfert

L'expérience acquise en mines souterraines et les mesures de prévention envisagées (dispositifs de freinage indépendants sur la poulie motrice, faisceau de câbles de suspension indépendants, système de freinage de fin de course, mais aussi procédures de maintenance, de contrôle et de fonctionnement) rendent très peu probable la chute de la cage dans le puits durant le transfert des colis. Si, malgré ces dispositions, un tel événement se produisait, la présence d'un amortisseur de chute en fond de puits limiterait l'endommagement de la hotte de transport : les simulations ont en effet prouvé qu'elle conserverait son intégrité mécanique et que le colis de stockage C (et de combustibles usés le cas échéant) placé à l'intérieur résisterait au choc sans rupture, le colis B pouvant être légèrement fissuré. Les colis primaires ne seraient en aucun cas affectés. Il n'y aurait donc pas de perte de confinement.

Les études ont toutefois envisagé l'hypothèse d'une rupture de la hotte et celle d'un relâchement de radionucléides. Des dispositifs complémentaires pourraient alors être mis en place pour isoler le puits et limiter les rejets à l'extérieur à un niveau très faible.

Le risque de criticité des assemblages de CU consécutif à une telle chute a aussi été étudié. Il n'apparaît pas envisageable compte tenu de l'ensemble des dispositions proposées pour limiter l'endommagement du colis.

1.3 Une exploitation réversible

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

1.3.1 Un processus par étapes

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

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

1.3.2 Les étapes clés du processus de stockage

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

• « Après mise en place des colis » : les alvéoles sont remplies de colis et non scellées. Des dispositifs en tête d'alvéole protègent les personnes présentes dans les galeries d'accès aux alvéoles. Les galeries sont ventilées et l'ensemble des infrastructures souterraines est accessible. *Cette étape est comparable à une configuration d'entreposage.*

• « Après scellement de l'alvéole » : cette étape débute après la fermeture des alvéoles par un bouchon d'argile gonflante. Les galeries d'accès aux alvéoles sont ventilées et les têtes d'alvéoles scellées sont accessibles.

 « Après fermeture d'un module » : cette étape débute à l'issue du scellement et du remblayage de toutes les composantes d'un module. Les modules B n'étant constitués que d'une alvéole, cette étape ne se distingue pas de la précédente. En revanche, dans le cas des déchets C (ou des combustibles usés), la fermeture du module comprend le remblayage des galeries d'accès internes au module. Les galeries de liaison desservant le module restent ventilées et accessibles.

• « Après fermeture d'une zone de stockage » : cette étape débute après remblayage et scellement des galeries de liaison internes à une zone de stockage. Les galeries de liaison principales donnant accès à la zone de stockage restent ventilées et accessibles.

• **« Post-fermeture »** : cette étape débute après le scellement et le remblayage des puits et correspond à la fin du processus de stockage. Celui-ci se trouve alors en configuration de « post-fermeture ». Une période d'observation du stockage fermé et de son environnement peut être envisagée. L'installation est rendue complètement passive, c'est-à-dire qu'elle assure la protection de l'homme et de l'environnement sans aucune intervention humaine.



5



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

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

1.3.3 Des possibilités d'observation *in situ* pour aider à la gestion réversible du stockage

Les choix de gestion du stockage s'appuient sur la compréhension de son évolution sur une échelle de temps pluriséculaire : des moyens d'observation aident au pilotage du processus réversible de stockage.

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

L'observation apporte aussi des informations pour apprécier les conditions d'une éventuelle récupération des colis.

Plus généralement, l'observation permet de vérifier que le fonctionnement demeure conforme aux prévisions et d'améliorer les modèles de comportement du stockage sur la base des données acquises.

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

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

- pour les alvéoles B, ce sont les contraintes induites sur le revêtement par la formation géologique, le degré de saturation de l'environnement proche de l'ouvrage et la production de gaz par certains déchets, ainsi que la température pour les alvéoles B contenant des déchets faiblement exothermiques,
- pour les alvéoles de stockage de déchets C (ou de combustibles usés), l'observation concerne le champ thermique dans et autour de l'alvéole, les contraintes mécaniques induites sur le chemisage par la formation géologique, le degré de saturation de l'environnement proche de l'alvéole et la composition de l'atmosphère de l'alvéole dont dépend la corrosion des composants métalliques,
- dans le cas des ouvrages d'accès (puits et galeries), l'observation suit l'évolution mécanique des revêtements et identifie un éventuel besoin de maintenance pour prolonger leur durée de vie. Elle surveille aussi l'évolution mécanique de la roche en champ proche derrière le revêtement aux emplacements des futurs scellements, notamment l'évolution d'une éventuelle zone endommagée.

La gestion du stockage implique aussi de surveiller les paramètres liés à la sûreté. Cette surveillance porte sur la sécurité et la sûreté opérationnelles (absence de conditions dangereuses ou de contamination radiologique, stabilité mécanique des ouvrages) et sur des éléments participant à la sûreté à long terme (par exemple, la température atteinte dans les alvéoles ou le faible impact d'une ventilation prolongée sur l'argilite). Les moyens d'observation ou de surveillance doivent pouvoir fonctionner de façon fiable, sur de longues durées, malgré l'inaccessibilité aux opérateurs, et dans des conditions d'environnement souvent agressives (rayonnement et température).

La surveillance

Développé en lien avec les fonctions de sûreté opérationnelle, le programme de surveillance vise à anticiper le développement de situations à risque et à déclencher les interventions en amont. La surveillance permet de signaler le besoin éventuel d'actions de maintenance et de conserver au mieux la flexibilité du processus de stockage. Elle porte sur l'état de bon fonctionnement des moyens d'exploitation (dispositifs de sécurité et sûreté, système de ventilation, réseaux...), les opérations (gestion du personnel et des flux d'engins, radioprotection, incendie...), la tenue mécanique et la stabilité dimensionnelle des ouvrages, la qualité de l'air (poussières, éléments toxiques...), les conditions de travail (atmosphères potentiellement déflagrantes, températures...).

Elle permet aussi de contrôler le respect de critères de sûreté à long terme (limites de températures et de taux de vide dans les ouvrages par exemple) et de vérifier que les évolutions des ouvrages ne sortent pas, pendant la phase d'exploitation observation, de façon irréversible du domaine de fonctionnement retenu pour la sûreté à long terme.

Autre exigence importante : la discrétion de ces moyens qui ne doivent pas perturber les conditions d'exploitation, dégrader la tenue des ouvrages, compromettre les fonctions de sûreté attribuées aux ouvrages ou les propriétés favorables du milieu (par exemple, les performances hydrauliques des scellements et du Callovo-Oxfordien), ni, autant que possible, interférer avec les phénomènes observés.

La conception de l'instrumentation des puits, galeries et alvéoles B bénéficie du retour d'expérience acquis pour les tunnels autoroutiers et ferroviaires ainsi que pour les ouvrages en béton comme les barrages hydrauliques et les enceintes de confinement des centrales nucléaires ; celle des alvéoles C et CU s'appuie sur le retour d'expérience acquis sur les pipelines, canalisations ou pieux de fondation ; celle la roche, sur les acquis en laboratoires souterrains.

Les « règles de l'art » développées sur la base du retour d'expérience de l'auscultation de nombreux ouvrages de génie civil suggèrent un ensemble de bonnes pratiques :

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



Dispositif d'observation d'une alvéole B témoin

Des moyens d'auscultation adaptés au stockage

Plusieurs technologies de mesure sont mises en œuvre dans les ouvrages de génie civil. Leur fiabilité pour un programme d'observation a été éprouvée :

• déformations, déplacements et contraintes mécaniques : extensomètres à corde vibrante (mesures de déformations locales) et à base longue pour les forages ou remblais (déformations sur de plus grandes distances), pendules verticaux (suivi du déplacement d'un ouvrage sur trois axes),

• évolution de la zone endommagée (EDZ) : extensomètres inductifs multicapteurs en forages, cellules de pression interstitielle, écoute acoustique par géophone ou accéléromètre,

• pression de l'eau interstitielle et débits : cellules de pression interstitielle à corde vibrante,



humidité relative : hygromètres à condensation,

• **température** : capteurs à corde vibrante (mesure ponctuelle), fibres optiques (mesure sur des profils longs),

• concentration en gaz toxiques, corrosion, contamination : détecteur d'hydrogène, inspection visuelle, prélèvements, mesures par ultrasons et témoins pour la corrosion, spectrométrie de masse pour la contamination radioactive,

• moyens de transmission et centralisation : câbles électriques et, surtout, capteurs à fibres optiques et transmission électromagnétique (sans fil) à basse ou très basse fréquence.

2. La fermeture réversible des ouvrages souterrains

2.1 Une fermeture progressive

Scellement des alvéoles de stockage, puis remblayage et scellement des galeries et des puits : le stockage peut être fermé en différentes étapes conformément à l'approche proposée pour la gestion réversible.

Des scellements faiblement perméables s'opposent à la circulation d'eau dans le stockage et l'isolent hydrauliquement des formations géologiques sus-jacentes, de manière passive et robuste sur le long terme. Posés dans les alvéoles, galeries et puits, ces dispositifs complètent les propriétés favorables du site et les dispositions de conception des installations. La limitation des écoulements contribue à recréer dans l'argilite, à l'échelle du stockage, un état proche de l'état naturel, à limiter l'altération des colis, puis le relâchement des radionucléides par les colis dégradés et leur migration par les galeries et les puits. Ces scellements multiples, en fractionnant le stockage, renforcent en outre la résistance du système de confinement vis-à-vis de situations altérées. Le matériau de remplissage retenu pour ces scellements est l'argile gonflante pour sa faible perméabilité, sa capacité de déformation et sa compatibilité avec l'argilite.

Le remblayage des galeries vise à limiter les déformations mécaniques dans le milieu géologique, notamment l'extension de la zone endommagée que la convergence des excavations (quand le revêtement ne joue plus son rôle) pourrait induire à long terme, afin de préserver les propriétés favorables de confinement de l'argilite du Callovo-Oxfordien.

L'Andra a étudié différentes dispositions de fermeture en privilégiant des options techniques simples et en prenant en compte dans la conception l'évolution phénoménologique des ouvrages sur la durée.



Réalisation de saignée à l'aide d'une scie (essai EZ-A réalisé au Mont Terri)



Brique d'argile gonflante (longueur réelle d'environ 20 cm)

2.1.1 La fermeture des alvéoles

2.1.1.1 Le scellement de l'alvéole B

La fermeture de l'alvéole de stockage de déchets B fait intervenir plusieurs étapes :

- pose d'un écran de protection radiologique, constitué d'une double rangée de blocs de béton, avec le même matériel de manutention que les colis,
- démontage des installations de la tête d'alvéole, du sas et de l'équipement de la galerie d'entrée,
- remplissage de la tête d'alvéole et constitution d'un massif d'appui amont avec du béton coulé jusque dans la galerie d'accès,
- creusement de saignées (30 cm de large, 1,5 à 3 m de profondeur) dans la galerie d'accès à l'alvéole à travers le revêtement pour interrompre la zone potentiellement fracturée et atteindre l'argilite intacte ou microfissurée (ancrage du scellement),
- remplissage des saignées avec de l'argile gonflante pour réduire la perméabilité globale du scellement,
- pose d'un noyau d'argile gonflante (35 m environ),
- construction d'un massif d'appui aval (5 m environ) de béton, coulé en masse et solidaire du revêtement.



Alvéoles de stockage de déchets B scellées

La réalisation des saignées

La technique envisagée pour leur réalisation limite l'apparition de nouvelles zones endommagées. La roche est découpée avec une scie équipée de pics (outil similaire aux « haveuses » utilisées en mines de sel ou dans les travaux souterrains, pour les pré-découpages en voûte par exemple). Puis la saignée ainsi créée est remplie par une argile gonflante semblable à celle du noyau du scellement.

La faisabilité technologique de la réalisation d'une saignée a été testée au laboratoire de Mont Terri (essai EZ-A). L'essai a permis de s'assurer de la possibilité de réaliser de telles saignées, de mettre en place un matériau argileux (blocs de bentonite précompactés) et de vérifier l'efficacité de ce dispositif pour interrompre la zone fracturée de la roche. Un essai similaire est aussi prévu courant 2005 dans le Laboratoire de Meuse/Haute-Marne (essai KEY).

2.1.1.2 Le scellement de l'alvéole C (ou de combustibles usés)

La fermeture de l'alvéole de stockage de colis C s'opère selon les étapes suivantes :

- pose d'un bouchon métallique de protection biologique, une fois le dernier colis mis en place, par le même équipement que celui utilisé pour la mise en alvéole des colis de stockage,
- démontage du chemisage provisoire de la tête pour que le bouchon soit directement en contact avec la roche,
- pose immédiate (voire en parallèle) d'un bouchon d'argile gonflante (3 m environ) pour ne pas laisser les terrains sans support mécanique. L'argile gonflante est compactée in situ pour garantir l'adhérence du bouchon avec le terrain et éviter tout risque de vide,
- pose d'un bouchon en béton (4 m environ) pour le confinement mécanique de l'argile gonflante, par coulage ou par projection.

La fermeture d'une l'alvéole de combustibles usés procèderait des mêmes principes que la fermeture de l'alvéole C.

2.1.2 La fermeture des galeries

La fermeture des galeries d'accès aux alvéoles de stockage et des galeries de liaison implique :

- de les remblayer pour assurer la stabilité mécanique d'ensemble à long terme et limiter les déformations dans la roche. Au vu des volumes importants de remblai à mobiliser, l'Andra a étudié la possibilité d'employer l'argilite excavée comme matériau de base du remblai (déblais broyés et préparés après leur stockage sur la verse),
- puis de les sceller selon les principes exposés pour les scellements des alvéoles B.

2.1.3 La fermeture des puits

Lorsque le choix en est fait, les puits reliant les installations souterraines et la surface sont scellés. Le scellement d'un puits comprend, dans l'ordre de réalisation :

- un remplissage avec du béton de la base du puits et des galeries connectées aux recettes des puits pour assurer la stabilité mécanique de l'ensemble,
- un scellement à base d'argile gonflante, sur une hauteur de 30 m environ, isolant le stockage des formations sus-jacentes et de la biosphère. Le revêtement est déposé pour mettre l'argile gonflante en contact direct avec l'argilite et favoriser son adhérence. Les modélisations ont conclu à la faisabilité de cette opération sans créer d'endommagement supplémentaire,
- *un remblayage du puits* avec de l'argilite excavée jusqu'à la surface avec, à chaque niveau faiblement aquifère rencontré (Oxfordien d'une part, Tithonien et Kimméridgien d'autre part), *un bouchon à base d'argile gonflante (10 à 15 m environ)* pour isoler ces niveaux des autres.

2.2 La gestion réversible du stockage

L'évolution des ouvrages conditionne la capacité d'action sur le processus de stockage. L'analyse phénoménologique montre que les ouvrages resteront durablement en l'état à l'échelle de plusieurs siècles et que les conditions dans le stockage seront, sur cette échelle de temps, proches de celles d'un entreposage. L'Andra a intégré, à la conception des ouvrages, l'éventualité d'un retrait des colis qui pourrait être décidé par les générations futures.

2.2.1 Le comportement des ouvrages et la capacité d'action sur le processus d'exploitation

2.2.1.1 Les alvéoles B

Deux étapes ont un impact significatif sur le comportement de l'alvéole B pendant l'exploitation du stockage.

· L'étape « après mise en place des colis »

L'alvéole est ventilée et accessible dans les mêmes conditions qu'à la mise en stockage des colis ; sa tête est équipée du sas de radioprotection et des dispositifs mécaniques de mise en place des colis. Les galeries d'accès sont ventilées, entretenues et accessibles. L'alvéole de déchets B est caractérisée par une stabilité géotechnique qui conduit au maintien des jeux fonctionnels.

Durant cette étape, la ventilation évacue les gaz de radiolyse et la chaleur éventuellement dégagés par certains colis, et les déformations du revêtement sont trop faibles pour modifier la géométrie de la chambre de stockage.

La durée de retrait possible des colis est donc limitée par la durée de vie du revêtement. Cette durée de vie est d'au moins 200 à 300 ans. Durant l'exploitation, les moyens d'observation permettraient de réévaluer régulièrement et d'affiner la prévision de cette durée de vie. Si l'on souhaitait prolonger cette durée sur des échelles de temps plus longues, l'intervention de l'homme serait nécessaire, notamment pour reprendre les colis et adapter les installations.

Les conditions de stockage sont similaires à celles d'un entreposage.

· L'étape « après scellement de l'alvéole »

Après la fermeture de l'alvéole, l'accessibilité aux colis se réduit et l'arrêt de la ventilation dans l'alvéole y modifie les conditions physiques, en déclenchant notamment sa resaturation ainsi que celle du scellement. Cette évolution reste toutefois très lente à cause de la très faible perméabilité des argilites. L'absence d'eau dans l'alvéole au-delà de plusieurs siècles limite fortement la dégradation chimique du revêtement, des colis de stockage et des colis primaires. L'évolution de l'alvéole résulte surtout de l'augmentation très lente et progressive de la poussée des argilites du Callovo-Oxfordien sur son revêtement au cours de leur resaturation. Cette poussée est suffisamment faible pour que le revêtement et le béton de remplissage conservent leur intégrité durant plusieurs siècles. Le revêtement et les jeux fonctionnels entre les colis et la paroi ne se dégradent donc pas après fermeture de l'alvéole.

De même, la faible évolution du scellement facilite son éventuel démantèlement dans le cas d'un retour en arrière pour récupérer les colis ou pour revenir à des conditions d'exploitation proches de celles d'un entreposage.



Représentation schématique des principaux phénomènes au sein d'une alvéole de déchets B après fermeture

La très lente évolution de l'alvéole et du scellement préserve la possibilité de retirer les colis sans limitation dans la durée autre que celle déjà mentionnée à l'étape précédente, à savoir la durée de vie du revêtement de l'alvéole. Le maintien en état des galeries de liaison et des puits, ainsi que leur ventilation, garantissent une accessibilité totale aux scellements des galeries d'accès aux alvéoles.

Les étapes suivantes « après fermeture de la zone de stockage » et « post-fermeture » n'ont aucun impact notable sur l'évolution et la gestion des alvéoles de déchets B, si ce n'est la réduction de leur accessibilité.

2.2.1.2 Les alvéoles de déchets C (et de CU)

Leur évolution est marquée pendant l'exploitation du stockage par trois étapes principales.

L'étape « après mise en place des colis »

L'alvéole remplie de colis est équipée d'un bouchon de protection radiologique inséré dans le chemisage. Sa tête, dotée du dispositif mécanique de mise en place des colis, reste accessible dans les mêmes conditions qu'au moment de la mise en stockage. Les galeries d'accès sont ventilées, entretenues et accessibles.

Durant cette étape, comme dans les suivantes, l'évolution de l'alvéole est essentiellement liée au dégagement thermique dû aux déchets, qui provoque une montée, assez rapide, de la température de l'alvéole et des argilites ainsi qu'un échauffement de la roche en paroi des galeries d'accès aux alvéoles (au maximum 60 °C). Dans les galeries, la ventilation maintient l'air à une température compatible avec l'intervention du personnel. Grâce aux jeux ménagés entre les colis d'une part, et entre les colis et le chemisage d'autre part, les phénomènes de dilatation thermique ne créent pas de contraintes thermomécaniques sur les colis et les déformations sont suffisamment faibles pour ne pas les bloquer.

L'environnement physico-chimique de l'alvéole et le capot d'étanchéité posé en tête d'alvéole pour limiter les échanges d'air avec la galerie conduisent à un régime de corrosion très lent du chemisage, garantissant sa durabilité. Il n'y a pas, ou peu, d'eau qui parvient au contact des colis, ce qui limite aussi très fortement la corrosion du conteneur. La durée de retrait possible des colis est, en pratique, peu limitée par l'évolution de l'alvéole, qui est très lente. Avec le dimensionnement proposé, le chemisage reste intègre pendant une durée de plusieurs siècles (200 à 300 ans, et vraisemblablement beaucoup plus longtemps). Comme pour les alvéoles B, une intervention humaine serait nécessaire si l'on souhaitait prolonger cette durée.

Le maintien du jeu fonctionnel entre colis et l'intégrité du chemisage et des colis facilitent le retrait éventuel des colis. La gestion des colis, en particulier leur retrait éventuel, est alors équivalente à ce qu'elle pourrait être en entreposage.



Représentation schématique des principaux phénomènes au sein d'une alvéole de déchets C après la mise en place des colis

L'étape « après scellement des alvéoles »

Après la fermeture de l'alvéole, la ventilation des galeries d'accès est maintenue et les têtes d'alvéole scellées sont accessibles dans les mêmes conditions qu'à l'étape précédente. Le démantèlement du scellement et le retrait des colis sont techniquement possibles.

L'absence de corrosion notable dans le chemisage permet le retrait des colis de manière relativement simple pendant au moins 200 à 300 ans après sa mise en place, comme à l'étape précédente. L'observation de la poussée du terrain sur le chemisage et des déformations du chemisage dans quelques alvéoles témoins permettrait de réévaluer la durée de vie du chemisage indépendamment de la fermeture ou non de ces alvéoles.

Le maintien de la ventilation dans les galeries d'accès n'a pas d'impact notable sur l'évolution des alvéoles et de leur bouchon, ni sur l'épaisseur de roche non perturbée en vue de la sûreté à long terme.

· L'étape « après fermeture d'un module »

La fermeture d'un module est caractérisée par le scellement et le remblayage des galeries d'accès aux alvéoles. La ventilation des galeries d'accès aux modules est maintenue. La fermeture des galeries du module n'a pas d'impact notable sur les alvéoles ; ce sont surtout les galeries remblayées et le massif d'appui en béton en tête d'alvéole qui subissent des évolutions très lentes dues à l'arrêt de la ventilation et à la mise en place de matériaux de remblai.

La resaturation des galeries est très lente et s'étend sur plusieurs dizaines de milliers d'années. Le revêtement des galeries remblayées, dont la maintenance ne peut plus être assurée, se dégrade aussi très lentement, principalement du fait de la corrosion anoxique des armatures ou des cintres par les faibles quantités d'eau venant de la roche. Quelques décennies ou un siècle après remblaiement, l'évolution du remblai et du revêtement de la galerie est très limitée.

Ainsi, cette étape se caractérise davantage par la réduction d'accessibilité aux colis due au remblaiement des galeries que par l'évolution phénoménologique du module.

De même que pour les alvéoles B, les étapes suivantes « après fermeture de la zone de stockage » et « postfermeture » n'ont pas d'impact notable sur l'évolution et la gestion des alvéoles de déchets C, si ce n'est la réduction de leur accessibilité.

2.2.1.3 Le comportement des ouvrages de liaison pendant l'étape « après fermeture d'une zone de stockage »

La décision de fermer les galeries de liaison secondaires (à l'intérieur des zones de stockage) constitue une étape importante qui rend l'accès aux colis de plus en plus difficile, même s'il existe des solutions techniques pour déblayer les galeries.

Pour les zones de stockage B, le remblaiement des galeries de liaison secondaires ne réduit que faiblement l'accessibilité car le volume à déblayer est relativement limité (quelques dizaines de milliers de m³).

En revanche, pour les zones de stockage C (ou de CU), l'accessibilité aux colis devient plus réduite car les volumes à déblayer sont significativement plus importants. L'évolution des galeries remblayées dans ces zones est très lente, la température tend à s'homogénéiser au sein de la roche et des galeries remblayées, l'échauffement est limité. La resaturation des scellements et des remblais est lente (un millier d'années pour les scellements, plusieurs dizaines de milliers d'années pour les remblais) et le sera d'autant plus que la ventilation aura été maintenue longtemps. Cette lente resaturation limite la dégradation chimique (par corrosion ou hydrolyse) du revêtement des galeries. L'absence d'évolution notable des ouvrages après fermeture, pendant un à plusieurs siècles, facilite un éventuel retour en arrière pour démanteler un scellement ou retirer des colis.

• Les galeries de liaison principales encore accessibles peuvent être laissées en l'état pendant quelques siècles du fait du dimensionnement de leur revêtement, du maintien de la ventilation et des travaux de maintenance éventuels. Le maintien de la ventilation n'augmente pas l'extension de la zone de roche microfissurée qui apparaît en paroi lors de leur construction, ni celle de la zone d'argilites déjà désaturée (degré de saturation proche de 90%) par plusieurs décennies de ventilation.

• **Dans les puits,** il en va de même. La stabilité est assurée durant plusieurs siècles par leur conception et leur dimensionnement.

Comme pour la fermeture des galeries de liaison secondaires, la fermeture des galeries de liaison principales entre les zones de stockage et les puits peut se faire progressivement. De même, un des puits pourrait être remblayé et scellé avant la fermeture de toutes les galeries pour pouvoir bénéficier d'un retour d'expérience sur la fermeture d'un puits avant le passage du stockage en phase de post-fermeture.

2.2.2 Les modalités de retrait des colis

Le retrait des colis de stockage pourrait être décidé par les générations futures. Pour le faciliter, l'Andra a intégré cette éventualité dans la conception des installations qu'elle propose. Les équipements et processus de retrait des colis sont similaires à ceux utilisés pour leur mise en place. Toutefois les conditions de ce retrait diffèrent selon la situation de l'alvéole, qui peut être scellée ou non, et celle de sa galerie d'accès ou des galeries du module qui peuvent être accessibles ou non.

2.2.2.1 Le retrait des colis B

Dans la conception des colis et alvéoles B, deux éléments favorisent le retrait éventuel des colis :

- la durabilité du colis et sa robustesse. Le béton assure au colis une durabilité mécanique pluriséculaire. Le recours limité aux métaux et l'emploi d'acier inox réduisent les phénomènes de corrosion,
- la stabilité du revêtement de l'alvéole et la pérennité des jeux fonctionnels. Le dimensionnement du revêtement, son béton constitutif et les conditions physico-chimiques dans lesquelles il est placé assurent la pérennité et la stabilité mécanique de l'alvéole pendant plusieurs siècles. En outre, sa forme minimise les jeux résiduels avec les colis, ce qui permet d'éviter leur comblement qui rendrait les colis prisonniers et solidaires de la structure.

Les équipements et le processus de retrait des colis sont semblables à ceux retenus pour leur mise en place mais la remise en état préalable diffère, selon que l'alvéole est scellée ou non :

- après mise en place des colis, ceux-ci peuvent être retirés à tout moment comme dans un entreposage. La remise en état se limite à une révision des équipements si le retrait intervient quelques années après la mise en place des colis, ou à un remplacement des équipements qui seraient devenus obsolètes, dans le cas d'un retrait après plusieurs décennies,
- après fermeture de l'alvéole (par un bouchon d'argile gonflante confiné mécaniquement par un massif d'appui en béton), il est d'abord nécessaire de contrôler l'atmosphère de l'alvéole à partir d'un forage horizontal tubé depuis l'entrée de la galerie et traversant tout le scellement. Il faut ensuite rétablir la ventilation pour évacuer l'hydrogène et les éventuels radionucléides gazeux émis par les colis : plusieurs solutions sont envisageables, notamment le percement d'une galerie de retour d'air spécifique pour évacuer l'air par le fond des alvéoles.



Processus de déconstruction du scellement d'une alvéole B

Le dégagement de la galerie d'accès à l'alvéole et la déconstruction du scellement peuvent ensuite être réalisés avec une machine minière de creusement, la protection radiologique étant assurée par le mur de protection biologique de béton qui obture l'alvéole. Après quoi, il est possible de rééquiper la tête d'alvéole (pose des portes blindées et du plancher mobile du sas...) selon un procédé similaire aux opérations de construction initiale. Le retrait des colis peut alors intervenir.

2.2.2.2 Le retrait des colis C (et CU)

Dans la conception des colis et alvéoles C (et CU), plusieurs éléments favorisent le retrait éventuel des colis :

- la durabilité des conteneurs et leur isolation par des éléments en céramique (patins) qui évitent le contact acier/acier avec le chemisage et préviennent les phénomènes de collage par corrosion susceptibles de se produire lorsque deux aciers de même nature sont en contact. Les colis de stockage restent donc libres dans le chemisage,
- l'intégrité du chemisage de l'alvéole, conçu pour limiter les déformations longitudinales et radiales sur une durée de plusieurs siècles, qui préserve le jeu de manutention entre le chemisage et le colis.

Là encore, les équipements et le processus de retrait des colis sont semblables à ceux retenus pour leur mise en place, mais la remise en état préalable diffère selon que l'alvéole est scellée ou non :

- après mise en place des colis, un bouchon métallique est placé à l'intérieur de l'alvéole pour assurer la protection radiologique du personnel présent dans la galerie d'accès et la tête d'alvéole est équipée d'un capot d'étanchéité qui limite le renouvellement d'air dans l'alvéole. Ces dispositifs peuvent être ouverts à tout moment. Après des contrôles en tête d'alvéole (vérification de l'absence de gaz susceptible de gêner les opérations de retrait et de l'état du chemisage provisoire), l'alvéole est rééquipée (remise en place de l'operculaire notamment) pour permettre l'accostage de la hotte et des équipements de manutention. Le retrait des colis peut alors s'effectuer en utilisant des équipements similaires (robot mobile et treuil) à ceux utilisés pour leur mise en place,
- après la fermeture de l'alvéole (par un bouchon d'argile gonflante confiné mécaniquement par un bouchon de béton), il est nécessaire, après contrôle de l'atmosphère et contrôle visuel de l'alvéole, de déconstruire le scellement et de poser simultanément dans l'alvéole un tubage de soutènement. Ces opérations peuvent être réalisées par une foreuse horizontale. Un chemisage provisoire peut alors être mis en place et connecté au chemisage du corps de l'alvéole. La tête d'alvéole peut ensuite être rééquipée (remise en place de l'operculaire) pour la reprise des colis avec un équipement similaire à celui utilisé pour leur mise en stockage : hotte de protection dotée d'équipements fixes (treuil) et d'un robot mobile,
- après la fermeture des galeries du module, les scellements de galeries de liaison peuvent être déconstruits avec le même procédé que celui utilisé pour la déconstruction du scellement des alvéoles B. Le retrait des remblais s'effectue aussi avec des techniques minières classiques. Le revêtement des galeries doit être inspecté au fur et à mesure du déblaiement et, le cas échéant, renforcé avec des boulons ou des cintres suivant des techniques classiques dans le génie civil ou minier.

2.2.3 Les niveaux de réversibilité et la possibilité d'une gestion différenciée

Les analyses et études techniques permettent de définir différents niveaux pour la réversibilité en lien avec le schéma par étapes proposé.

2.2.3.1 Flexibilité globale du processus de stockage

La conception modulaire de l'architecture souterraine permet une mise en œuvre progressive du processus de stockage tant pour la mise en alvéole des colis de déchets que pour la fermeture des installations. La première étape de mise en alvéole ne concernerait ainsi qu'une partie de l'inventaire des déchets.

Cette progressivité permettrait aussi la coexistence d'alvéoles, de galeries ou de modules dans des états de réversibilité différents. Ainsi, la première étape du processus de fermeture ne concernerait que le scellement des alvéoles de certains modules, les autres composantes de l'architecture restant accessibles et maintenues.

Un telle approche autorise différents scénarios de gestion et permet de tester des configurations variées pour effectuer des comparaisons et affiner la gestion du processus de stockage, en confortant la flexibilité d'ensemble. Il est ainsi possible de tirer parti du retour d'expérience des premières phases du processus et de faire évoluer en conséquence la conception des ouvrages de stockage ainsi que les moyens et les procédés de construction, d'exploitation et de fermeture.

2.2.3.2 Accès possible aux modules et alvéoles de stockage des déchets B

Tant que les alvéoles ne sont pas fermées par un scellement, la réversibilité du stockage des déchets B est totale. Elle nécessite de maintenir la ventilation dans les ouvrages d'accès aux modules de stockage et dans les alvéoles. Une partie des alvéoles B (alvéoles témoins) fait l'objet d'un programme d'observation.

Les ouvrages d'accès aux alvéoles doivent aussi faire l'objet d'une observation, d'une surveillance et, au besoin, d'une maintenance. Le stockage offre alors la même souplesse de gestion des colis qu'un entreposage et crée des conditions environnementales relativement constantes favorisant la durabilité des colis. Le retrait des colis peut se faire par simple inversion du processus de mise en place.

Le scellement des alvéoles diminue le niveau de réversibilité car il réduit l'accessibilité aux colis. Le retrait des colis, s'il est décidé, reste techniquement possible tant que le revêtement est intact, grâce au maintien de leur intégrité et des jeux fonctionnels dans l'alvéole. Il nécessite cependant des travaux préparatoires : déblaiement du scellement, rééquipement de la tête d'alvéole (sas) et rétablissement d'une ventilation dans l'alvéole.

Hormis cette réduction d'accessibilité aux colis, la souplesse de gestion du stockage n'est pas limitée par la fermeture d'une ou de plusieurs alvéoles : les possibilités de construction, d'exploitation (d'autres modules ou zones de stockage) et d'attente avant remblaiement des galeries de liaison sont inchangées.

2.2.3.3 Accès possible aux modules et alvéoles de stockage des déchets C (et des CU)

La réversibilité du stockage des déchets C ou des CU est, comme pour les déchets B, totale tant que les alvéoles ne sont pas scellées. Elle nécessite également de maintenir la ventilation dans les ouvrages d'accès aux modules de stockage. Comme pour les déchets B, une partie des alvéoles C (alvéoles témoins) fait l'objet d'un programme d'observation.

La gestion des colis, en particulier leur récupérabilité, est équivalente à celle d'un entreposage, même si les conditions d'évacuation de la chaleur (par conduction dans la roche ou dans la barrière en argile gonflante) diffèrent.



Alvéoles C scellées

Le scellement d'une partie ou de toutes les alvéoles d'un module diminue le niveau de réversibilité, surtout à cause de la moindre accessibilité des colis. L'ampleur des travaux pour enlever le bouchon d'argile et son massif de béton est toutefois modérée (quelques m³ par alvéole). Le retrait des colis implique des opérations spécifiques qui ont été étudiées et apparaissent techniquement possibles. La fermeture d'une ou de plusieurs alvéoles ne réduit pas la souplesse de gestion du stockage.





Accessibilité aux têtes d'alvéoles C pour la mise en place des colis

Accessibilité aux têtes d'alvéoles C après mise en place du scellement

Le remblaiement des galeries d'accès à l'intérieur d'un module induit une plus forte baisse du niveau de réversibilité que l'étape précédente car il réduit de manière plus significative l'accessibilité aux colis, même s'il est techniquement possible de déblayer de grandes longueurs de galeries fermées. Les travaux à réaliser pour un retour en arrière sont d'une plus grande ampleur.

2.2.3.4 Accès possible aux galeries principales et aux puits

Dans les étapes suivantes de fermeture progressive des galeries de liaison et des puits, le niveau de réversibilité décroît uniquement du fait de la réduction d'accessibilité aux colis : pour un retour en arrière, la quantité de matériau à déblayer est à l'échelle de la quantité de matériau excavé pour la construction des ouvrages.

Tant que les ouvrages d'accès (puits et galeries) ne sont pas remblayés, il est nécessaire d'en assurer la maintenance. La ventilation des ouvrages peut, quant à elle, être pleinement maintenue ou limitée à certaines zones. L'accès à une zone où la ventilation aurait été arrêtée ne serait alors possible qu'après sa remise en route et un délai (préavis de ventilation).

2.2.4 La durée minimale de la gestion réversible du processus de stockage

Tout au long du processus de stockage, la stabilité mécanique des alvéoles de stockage conditionne la facilité de retrait éventuel des colis.

La conception du revêtement des alvéoles de déchets B et du chemisage des alvéoles de déchets C (ou de combustibles usés) leur confère une stabilité mécanique pendant 200 à 300 ans sans maintenance particulière, et pratiquement indépendamment du franchissement des étapes de fermeture. Compte tenu des marges de dimensionnement, les alvéoles devraient en fait être stables plus longtemps encore. L'observation de ces ouvrages permettrait de réévaluer régulièrement leur durée de vie. Pour prolonger au-delà de deux à trois siècles la durée possible de retrait des colis, des travaux spécifiques (maintenance renforcée, confortement d'ouvrages, reconstruction...) seraient nécessaires, pouvant nécessiter un retrait temporaire des colis qui y sont stockés. La complexité de ces travaux croît à mesure du franchissement des étapes de fermeture, car cela implique la réouverture de parties scellées pour accéder aux alvéoles.

163

La durée de stabilité du revêtement des ouvrages d'accès (galeries et puits) peut, quant à elle, être accrue par des travaux de maintenance tant que ces ouvrages sont accessibles. Elle est, comme pour les alvéoles, d'au moins plusieurs siècles. Les mesures *in situ* effectuées durant leur ouverture, et éventuellement après leur fermeture, permettraient là encore de préciser cette durée.

On considèrera que le terme ultime en matière de gestion réversible du processus de stockage est la rupture mécanique du revêtement des alvéoles. En effet, au-delà de cette borne, le retrait des colis bloqués par la formation géologique nécessiterait la mise en œuvre simultanée de moyens miniers et nucléaires. Bien que techniquement possible (retour d'expérience de certains gisements riches en uranium), leur mise en œuvre caractérise un faible niveau de réversibilité.

Une durée de deux à trois siècles constitue donc la durée minimale pendant laquelle le processus de gestion réversible par étapes peut être mis en œuvre sans nécessiter d'opérations lourdes d'un point de vue technique. Concrètement, cela signifie que, quel que soit le niveau de fermeture du stockage, le retrait des colis d'une alvéole peut se faire, après rétablissement de l'accès à l'alvéole, avec des moyens de manutention comparables à ceux utilisés pour leur mise en place. Pour prolonger cette durée, il serait ensuite nécessaire, d'un point de vue technique, d'adopter des mesures spécifiques.



5

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile L'exploitation réversible du stockage

165



6

Le comportement et la sûreté à long terme du stockage et de son environnement

p.169 > 1. Le comportement à long terme du stockage et de son environnement - Les points marquants

p.186 > 2. L'évaluation de la sûreté à long terme du stockage

p.222 > 3. Bilan sur la robustesse du concept de stockage

Le comportement et la sûreté à long terme du stockage et de son environnement

L'une des finalités principales du stockage en formation géologique profonde est d'offrir la possibilité de disposer d'une installation qui puisse, à terme, se passer de l'intervention de l'homme et évoluer de manière passive en toute sûreté. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'un ensemble de connaissances permettant de décrire avec un degré de confiance élevé le comportement à long terme du stockage et de servir de base à l'analyse de sûreté.

Durant la phase d'exploitation d'un stockage, la sûreté relève d'une approche opérationnelle classique, commune à d'autres installations de même nature. La principale complexité réside dans la co-existence d'activités minières et nucléaires. L'atteinte d'un haut niveau de sûreté dépend principalement des dispositions de conception, de la compétence et de la vigilance permanente des équipes en charge du stockage.

Dans un contexte de réversibilité, la période d'observation du stockage s'apparente, du point de vue de la sûreté, à la phase d'exploitation : les mêmes règles destinées à protéger le personnel s'appliquent. Le stockage réversible suppose en effet la présence de l'homme pour contrôler, surveiller et maintenir les installations. Par ailleurs, il n'est pas possible de fixer, de manière arbitraire, des limites temporelles à la réversibilité. Une durée séculaire à pluriséculaire n'apparaît pas comme soulevant d'obstacles particuliers pour les installations telles qu'elles sont conçues. Si l'on souhaitait prolonger cette durée, il serait nécessaire d'adapter progressivement les installations et d'examiner plus avant la stratégie de gestion des déchets.

Ce chapitre présente une troisième phase de la vie du stockage : son comportement à long terme après fermeture, ainsi que la démarche et les analyses de sûreté qui visent à s'assurer que le stockage pourrait évoluer, après fermeture, sans intervention humaine, tout en respectant les objectifs de protection de l'homme et de l'environnement. A ce stade, le phénomène de décroissance de la radioactivité au cours du temps constitue un des composants importants du système.

Le mode d'analyse proposé, ou démarche de sûreté, repose sur plusieurs principes.

- L'analyse de sûreté s'appuie d'abord sur une connaissance approfondie des phénomènes susceptibles de se dérouler dans le stockage et sur la compréhension du comportement à long terme du stockage et de son environnement. Elle mobilise les travaux scientifiques, les résultats expérimentaux, les modélisations et leur mise en perspective sous forme d'une analyse phénoménologique.
- Toutefois, le stockage constitue, par le nombre et la durée des phénomènes qui s'y déroulent, un système d'une relative complexité. L'analyse de sûreté est un outil qui, à partir de la connaissance approfondie des phénomènes, les hiérarchise en mettant en lumière les points cruciaux. L'analyse tire, d'une phénoménologie riche et complexe, un schéma prudent qui se prête à une représentation sous forme de modèles simplifiés et à des simulations numériques. Partant de ce schéma, elle teste la pertinence des fonctions de sûreté imparties aux différents composants et évalue les performances globales du système de stockage passif. Elle prend en compte les incertitudes sur l'évolution du stockage, les limites de validité des modèles et les possibles variations des paramètres. Elle permet de traiter les incertitudes ainsi que les situations qui échappent à l'évolution attendue, sous forme d'incidents indépendants de la volonté du concepteur (par exemple une intrusion dans le stockage) ou de défaillance de certains composants. Elle débouche sur un ensemble de calculs et d'évaluations qui visent à apprécier la conformité de l'impact calculé du stockage avec



6

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le comportement et la sûreté à long terme du stockage et de son environnement

les normes de radioprotection. Elle produit des indicateurs de sûreté, c'est-à-dire des paramètres qui permettent de juger de la sûreté du stockage sous forme quantifiée. Elle met en évidence les différentes marges de sûreté que recèle le stockage.

Au final, elle permet de porter un jugement sur la robustesse du concept de stockage en formation géologique profonde.

1. Le comportement à long terme du stockage et de son environnement -Les points marquants

La compréhension de l'évolution phénoménologique du stockage, de son environnement géologique et de surface est étroitement associée à la conception et constitue l'un des fondements de l'évaluation de sûreté. *Cette compréhension, notamment par son caractère systématique, doit permettre de rendre compte des processus qui conditionnent ou contrôlent le comportement et la migration des radionucléides. Il est alors possible de vérifier que le stockage, tel qu'il est conçu, et son milieu géologique environnant garantissent la sûreté.*

L'analyse concerne la période, séculaire à pluriséculaire, de construction et d'exploitation du stockage jusqu'à sa fermeture ainsi que la période post-fermeture, soit une échelle de temps d'un million d'années choisie en rapport avec la durée de décroissance de la radioactivité des déchets.

La description de l'évolution phénoménologique s'appuie sur les connaissances scientifiques et technologiques actuelles et prend en compte les incertitudes de toute nature qui leur sont associées. Dans ce cadre, l'évolution phénoménologique dite « normale » du stockage est l'évolution considérée comme la plus probable au regard des connaissances scientifiques. Cette évolution résulte des dispositions de conception du stockage, qui tirent parti des caractéristiques favorables du milieu géologique et contribuent à limiter la complexité des phénomènes et les incertitudes sur le comportement phénoménologique du stockage.

Décrire l'évolution phénoménologique d'un ensemble de composants ouvragés (colis, alvéoles, galeries, puits...) et naturels (couche géologique-hôte et encaissants) suppose de disposer d'une vision d'ensemble des processus régissant l'évolution du stockage et de leur couplage. Il faut donc traiter successivement les grands phénomènes affectant le stockage en mettant en lumière leurs implications sur les autres processus. On s'intéresse ainsi aux processus relevant de la thermique, de l'hydraulique, de la chimie et de la mécanique avant de déboucher sur ceux relatifs au relâchement et au transfert des radionucléides.

· L'analyse de l'évolution phénoménologique des situations de stockage

Pour appréhender la complexité du stockage, l'Andra a décomposé son évolution en différentes situations : chacune correspond à l'état phénoménologique d'une partie du stockage ou de son environnement à un moment donné de la vie du stockage et reflète les phénomènes thermiques, hydrauliques, chimiques et mécaniques mis en jeu avec leurs enchaînements et leurs couplages. L'ensemble de ces situations, appelé, analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS), définit l'évolution du stockage et de son environnement géologique.

L'APSS fournit :

- des résultats utilisables pour les études de conception du stockage et de dimensionnement des ouvrages,

 des éléments d'analyse sur l'influence de la durée d'exploitation et de réversibilité vis-à-vis des différents phénomènes. Il a été en particulier montré que le schéma d'évolution du stockage après la fermeture de celui-ci est peu sensible aux hypothèses considérées pour la durée d'exploitation, pouvant se poursuivre sur une période pluriséculaire,

169

- des données d'entrée pour la modélisation et la simulation numérique des phénomènes et de leurs couplages, en vue notamment des analyses de sûreté.

Deux principes guident l'APSS : un souci de complétude pour répondre aux exigences des analyses de sûreté, un souci de traçabilité des hypothèses et choix retenus pour pouvoir actualiser l'analyse au fur et à mesure des acquisitions de connaissances et des développements.

Des architectures simplifiant la compréhension du comportement du stockage

La compartimentation (fractionnement) des architectures de stockage proposées contribue à simplifier la compréhension des processus thermiques et hydrauliques liés au stockage. L'éloignement de plusieurs centaines de mètres entre les zones de stockage entraîne des évolutions thermiques et hydrauliques de ces zones quasi indépendantes. Dans une zone de stockage, les distances entre les modules et entre les alvéoles permettent des interactions thermiques et hydrauliques. Toutefois la structure du milieu et la conception proposée en limitent fortement l'ampleur. Dans ces conditions, l'analyse de l'évolution du stockage peut être abordée quasi-indépendamment pour décrire les zones B, C et CU. Ceci simplifie très significativement l'étude des conséquences de cette évolution sur le relâchement des radionucléides.

· Les modélisations des phénomènes et de leurs couplages, la simulation

Au-delà du travail d'identification, il faut, pour chaque situation de stockage, disposer d'outils de modélisation et de simulation pour apprécier et quantifier, sur de grandes échelles de temps et d'espace, les évolutions dues aux phénomènes mis en évidence. Des outils ont donc été associés à chaque situation de stockage pour *analyser et simuler le fonctionnement du stockage en réalisant des extrapolations sur des périodes de temps hors du champ de l'expérience.* Ce travail repose sur une identification et une caractérisation des phénomènes régissant l'évolution du stockage et des interactions entre ses constituants.

La démarche de modélisation et de simulation

La démarche de modélisation repose sur une description détaillée d'abord de la géométrie et des caractéristiques des composants du stockage, en particulier du milieu géologique, puis des différents processus susceptibles de modifier l'état initial du milieu géologique « en grand » (champ lointain) et du stockage (champ proche). La représentation du milieu géologique exploite les données obtenues en surface, en forages, sur échantillons et directement en laboratoire souterrain ou par des mesures d'auscultation géophysique. Pour les intégrer, on recourt à des logiciels de modélisation 3D développés pour l'industrie pétrolière comme GOCAD. La physique et la chimie des processus pilotant l'évolution du stockage et de son environnement sont décrites sur la base de résultats expérimentaux et de lois de comportement.

Différents codes de calculs sont ensuite sélectionnés en fonction de leur aptitude à prendre en compte au mieux ces phénomènes et à les simuler aux différentes échelles d'espace (différents composants du stockage et du milieu géologique) et de temps (différentes phases de la vie du stockage).

1.1 L'évolution thermique du stockage et de son environnement

La mise en place des colis exothermiques (déchets C, CU et, dans une moindre mesure, certains déchets B) s'accompagne d'une hausse progressive, mais transitoire de la température dans le stockage et le Callovo-Oxfordien : elle passe par un pic, puis décline avec la décroissance radioactive des déchets. Le stockage et le milieu géologique retrouvent ensuite des températures naturelles.

Si elle n'est pas, ou peu, influencée par les autres processus, hydrauliques, chimiques et mécaniques qui gouvernent l'évolution du stockage, la charge thermique affecte en revanche ces processus, notamment les phénomènes de corrosion, le relâchement et le transport des solutés.

Le fractionnement des ouvrages souterrains réduit considérablement les interactions thermiques entre les zones du stockage et à l'intérieur de ces zones. Avec la décroissance de la chaleur émise par les colis, l'influence thermique des zones de stockage est négligeable au-delà de 100 à 250 m, dans la direction verticale et horizontale (niveau médian de la couche du Callovo-Oxfordien). *Du point de vue thermique, les différentes zones de stockage, distantes de 250 m, sont donc (très largement) indépendantes.*

La conception du stockage limite la température à 90 °C maximum en tous points dans la roche. Elle permet

6

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le comportement et la sûreté à long terme du stockage et de son environnement

également d'assurer le retour à une température inférieure à 70 °C avant 1 000 ans. Une analyse détaillée montre que, dans les alvéoles de déchets exothermiques, le retour à des températures voisines de 40 °C s'effectue sur des durées millénaires (en 1 000 ans pour les alvéoles C, 6 000 ans pour les CU), très inférieures à la survenue de la perte d'étanchéité des colis de stockage et au relâchement des radionucléides.

Enfin, l'élévation des températures dans le Callovo-Oxfordien ne provoque pas de modification minéralogique des argilites susceptible d'altérer leurs capacités de confinement.

1.1.1 Une phase thermique de durée millénaire induisant des phénomènes transitoires d'ampleur globalement limitée

L'évolution thermique du stockage est appréhendée à différentes échelles : au niveau des alvéoles de stockage et des premiers mètres de Callovo-Oxfordien, à leur pourtour et, de façon plus globale, à l'échelle des formations géologiques (champ lointain).

Dans les alvéoles, les maxima de température sont atteints en quelques années pour les déchets B les plus exothermiques (70 °C), après 10 à 20 ans pour les déchets C et les CU (90 °C).

A l'échelle des modules, les températures s'homogénéisent avec leur décroissance : en 500 ans dans les modules de stockage B (où elles sont de 35 °C environ à cette échéance), en 1 000 ans dans les modules C (40 à 45 °C) et en 3 000 ans dans les modules CU (40 à 45 °C).

A l'échelle des zones de stockage, l'homogénéisation des températures est plus tardive : 2 000 ans pour les zones B (25 °C), 3 000 ans pour les zones C (30 à 35 °C) et 10 000 ans pour les CU (30 à 35 °C). Ces niveaux de température diminuent ensuite et *la durée de l'essentiel de la charge thermique dans le stockage et le Callovo-Oxfordien est limitée à quelques milliers d'années.* Ces durées sont très courtes au regard de celles des processus thermiques moteurs de l'évolution naturelle des formations sédimentaires (qui vont de plusieurs millions à dizaines de millions d'années).

Les élévations de température ne provoquent que des gradients thermiques modérés. Les plus importants (de l'ordre de quelques dizaines de °C.m⁻¹) sont atteints dans les alvéoles C et CU dans les premières années après la mise en stockage des colis, mais ils diminuent rapidement avec l'homogénéisation des températures dans les zones de stockage. Dans le Callovo-Oxfordien, ils sont plus faibles (quelques °C.m⁻¹) et limités à la proximité immédiate des alvéoles (quelques décimètres à quelques mètres) sur une période de 100 ans environ. Comme pour le stockage, ils diminuent rapidement avec l'homogénéisation des températures.



Evolution des températures dans la zone de stokage de déchets C, en coupe et en plan horizontal

Dans les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien, l'élévation maximale de température est atteinte après 500 ans et reste limitée : à 20 °C au maximum aux limites de la formation du Callovo-Oxfordien, à 5 °C en partie supérieure de l'Oxfordien, à moins de 1 °C pour le Kimméridgien et le Barrois.

171

Par conséquent, si l'on tient en outre compte de sa durée limitée, la charge thermique n'est pas un paramètre déterminant des évolutions phénoménologiques « en grand » du Callovo-Oxfordien et des formations encaissantes.

1.1.2 Des conséquences limitées et maîtrisées

Compte tenu de la durée limitée des processus thermiques et des températures maximales atteintes dans les différentes zones de stockage, les propriétés initiales de la couche d'argilite et les caractéristiques des composants du stockage ne sont pas, ou très peu, affectées. En particulier, les transformations minéralogiques dans le Callovo-Oxfordien sont de faible ampleur.

La charge thermique qui affecte le stockage et le Callovo-Oxfordien ne provoque pas de phénomènes mécaniques significatifs, notamment d'endommagement mécanique à l'échelle de la formation. La cinétique de montée en température est lente (quelques dizaines d'années) et la charge thermique est assez homogène à l'échelle du Callovo-Oxfordien. Le champ de contraintes thermomécaniques n'induit donc pas un endomma-gement (fracturation) de la couche « en grand ».

La durée limitée de la phase thermique signifie que l'évolution phénoménologique du stockage et de son environnement géologique se fait, pour l'essentiel, en conditions de température naturelle. En particulier, les durées d'étanchéité des conteneurs C et CU, liées à leur tenue à la corrosion et à leur tenue mécanique, respectivement de 4 000 ans et 10 000 ans au moins, assurent que le relâchement, puis la migration des radionucléides ne sont pas, ou peu, affectés par la charge thermique, la température dans les alvéoles étant alors inférieure à 40°C.

Le champ de température et son évolution dans le temps sont toutefois pris en compte dans les modèles de dissolution des matrices de confinement (verre par exemple), dans la détermination des paramètres régissant le transport des radionucléides (solubilité, coefficient de diffusion ou coefficient de partage entre fraction solide et soluble) dans le stockage et son environnement proche.

1.2 L'évolution hydraulique du stockage et de son environnement

Composante majeure de l'évolution phénoménologique, l'évolution hydraulique du stockage et de son environnement a des conséquences importantes sur les évolutions chimique et mécanique, donc sur la dégradation des colis de déchets et, in fine, sur le relâchement des radionucléides par les colis. Avec l'évolution chimique, elle détermine la mobilité des radionucléides relâchés et leur transfert vers la biosphère. Ainsi plus particulièrement :

- *l'initiation des processus chimiques* (dégradation des bétons par exemple) nécessite la présence d'eau et leur poursuite dans le temps et l'espace dépend fortement des flux d'eau et/ou des quantités de solutés susceptibles d'être transportés par ces flux ou de se déplacer par diffusion,
- le comportement mécanique des composants du stockage et des argilites du Callovo-Oxfordien dépend aussi de la présence d'eau. Cette dépendance peut être directe, par exemple pour les argilites (en particulier la zone endommagée par le creusement et l'exploitation), les bouchons d'alvéole et les scellements dont la plasticité et le comportement à la rupture résultent de leur état de saturation. Elle peut être indirecte, via les processus chimiques comme la corrosion qui modifie la résistance mécanique des composants en acier,
- le relâchement des radionucléides résulte surtout de la dégradation chimique et mécanique des colis sous l'effet de l'eau (corrosion des conteneurs métalliques, attaque des conteneurs en béton, altération de la matrice de verre). Après le relâchement des radionucléides, leur transfert vers la biosphère dépend en partie de l'écoulement de l'eau et des conditions de transport des solutés dans le stockage, puis dans le Callovo-Oxfordien et les formations encaissantes.

Avant la réalisation du stockage, les formations géologiques sont à l'équilibre hydraulique :

- dans le Callovo-Oxfordien, de très faibles écoulements d'eau s'organisent verticalement entre les formations carbonatées du Dogger et de l'Oxfordien, sous la différence de charges hydrauliques entre ces deux forma-

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le comportement et la sûreté à long terme du stockage et de son environnement

tions. Compte tenu de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien (5.10⁻¹³ à 5.10⁻¹⁴ m/s en moyenne), ces écoulements d'eau sont très faibles (quelques centièmes de millilitre par an et par m²) de même que leur vitesse (quelques centimètres environ par 100 000 ans). Dans ce contexte, le transport des solutés dans le Callovo-Oxfordien s'effectue majoritairement par diffusion ;

- *dans l'Oxfordien carbonaté et le Dogger*, les écoulements d'eau sont horizontaux. Compte tenu des perméabilités de certains niveaux de ces formations (10⁻⁹ m/s à 10⁻⁸ m/s en moyenne), le transport des solutés s'y effectue essentiellement par convection.

Le stockage perturbe cet état hydraulique initial. Les puits drainent les eaux des formations supérieures durant l'exploitation. La présence du stockage provoque aussi une désaturation des argilites autour des ouvrages souterrains ventilés durant la phase d'exploitation ainsi qu'après fermeture pendant la phase de production d'hydrogène liée à la corrosion des éléments métalliques du stockage (conteneurs de déchets, composants d'alvéoles...). Les perturbations hydrauliques induites par le stockage restent limitées au stockage lui-même et au Callovo-Oxfordien du fait de sa faible perméabilité. Elles disparaissent au-delà de 100 000 ans environ et un nouvel état d'équilibre hydraulique s'instaure alors dans le stockage et le Callovo-Oxfordien.

Au-delà de quelques centaines de milliers d'années et jusqu'au million d'années, les effets des cycles climatiques sont susceptibles d'engendrer des modifications de la morphologie des terrains de surface. Au cours de cette période, les évolutions géodynamiques et leurs conséquences en surface sont les principaux facteurs influant sur l'environnement géologique, en particulier sur les formations encaissantes sus-jacentes.

1.2.1 Une perturbation hydraulique locale dans les encaissants supérieurs liée à l'exploitation du stockage (échelle de temps séculaire)

Etanches au passage du Tithonien, les puits d'accès du stockage n'ont pas d'impact hydraulique sur cette formation. Les écoulements d'eau dans les autres formations encaissantes, Kimméridgien marneux et Oxfordien carbonaté, sont suffisamment faibles pour ne pas nécessiter une étanchéité des puits à leur passage. La présence des puits provoque une décharge hydraulique dans ces formations et une éventuelle désaturation : dans le Kimméridgien marneux, la décharge hydraulique est limitée et l'extension de la zone désaturée ne dépasse pas quelques dizaines de mètres radialement par rapport à l'axe des puits ; elle est plus importante dans l'Oxfordien et la zone désaturée s'étend sur plusieurs centaines de mètres.

Après la fermeture du stockage, le scellement des puits dans le Callovo-Oxfordien et les débits d'eau dans ces formations permettent un retour à l'équilibre hydraulique : en quelques centaines d'années dans l'Oxfordien carbonaté, en plusieurs milliers d'années dans le Kimméridgien marneux en raison de sa plus faible perméabilité.

La perturbation hydraulique engendrée par les puits sur les encaissants sus-jacents est donc un phénomène local réversible qui a disparu avant l'arrivée des radionucléides dans les encaissants sus-jacents (celle-ci n'est pas susceptible d'intervenir avant quelques centaines de milliers d'années).

1.2.2 Les perturbations hydrauliques dues au stockage dans la formation du Callovo-Oxfordien

1.2.2.1 Pendant l'exploitation : la désaturation du Callovo-Oxfordien au pourtour des ouvrages ventilés limite très fortement les processus chimiques et le fluage des argilites

La ventilation des galeries, puits d'accès et alvéoles de déchets B pendant l'exploitation provoque à leur pourtour *une désaturation des argilites* qui se combine à la décharge hydraulique progressant dans les argilites. Dans les galeries et puits d'accès, la désaturation affecte en quelques années toute l'infrastructure en béton et la zone endommagée créée par le creusement. Elle se propage ensuite très lentement jusqu'aux argilites saines durant la période séculaire à pluriséculaire d'exploitation.

Autour des alvéoles B, la désaturation progresse de manière similaire. Comme les composants ouvragés en béton des alvéoles, les colis de stockage sont fortement désaturés.

A l'inverse, l'absence de ventilation des alvéoles C et CU ainsi que leur obturation (capot d'étanchéité durant la phase d'exploitation) empêchent la désaturation des argilites à leur pourtour.

La période d'exploitation peut être considérée comme une période « sèche » pour les ouvrages ventilés. Les processus chimiques sont alors (très) limités, notamment la dégradation chimique des bétons d'infrastructure et des colis de stockage B. Sur le plan mécanique, l'état non saturé de tout ou partie de la zone endommagée tend à ralentir ou à arrêter le fluage des argilites, limitant ainsi la mise en charge mécanique du soutènement des infrastructures de stockage.

1.2.2.2 Après la fermeture : le transfert de l'hydrogène de corrosion et la resaturation du stockage en entier sur plusieurs dizaines de milliers d'années à une centaine de milliers d'années

Lorsque la fermeture des ouvrages est décidée, leur resaturation par les eaux des argilites s'initie, ainsi que celle des argilites éventuellement désaturées par la ventilation pendant l'exploitation. Compte tenu de la faible perméabilité des argilites, c'est un processus lent. Il s'accompagne de la production d'hydrogène résultant de la corrosion des composants métalliques (et dans une moindre mesure, de la radiolyse de l'eau ou de matières organiques) qui retarde le retour à la saturation complète.

Compte tenu des très faibles vitesses de corrosion (quelques microns/an[®]), la principale phase de production d'hydrogène dure quelques milliers d'années (de l'ordre de 5000 ans) dans les alvéoles de stockage C et CU et quelques centaines d'années (de l'ordre de 500 ans) dans les alvéoles B. Sur la base de travaux expérimentaux sur échantillons et en forage ayant permis d'apprécier les propriétés de transfert de l'hydrogène dans les argilites, des modélisations ont été réalisées pour apprécier le devenir de l'hydrogène.

L'hydrogène se dissout jusqu'à saturer l'eau en champ proche. L'excédent s'exprime alors sous forme gazeuse et migre par écoulement biphasique au travers de la zone endommagée jusque dans les galeries et dans les argilites saines, après que la pression de gaz a suffisamment augmenté pour permettre l'entrée du gaz dans la roche. Dans le cas des alvéoles CU contenant une plus grande quantité d'acier, la production de gaz est plus rapide que son évacuation par écoulement biphasique ; la pression de gaz dans l'alvéole augmente jusqu'à atteindre le seuil d'ouverture de la porosité (microfissuration) de l'argilite ou des composants ouvragés en argile gonflante (bouchons d'alvéoles ou scellements). L'ouverture de microfissures permet au gaz de s'écouler hors de l'alvéole, ce qui limite l'augmentation de pression. On a constaté sur échantillons et lors d'un essai en forage que les microfissures se referment après passage du gaz sans altérer les propriétés hydrauliques de la roche (la perméabilité à l'eau de l'argilite reste inchangée).

⁸ Ces vitesses majorent les vitesses attendues qui pourraient en fait être de l'ordre de la fraction de micron par an. La quantité d'hydrogène est ainsi surestimée. Avec les vitesses de corrosion plus faibles que celles considérées, les pressions de gaz seraient plus faibles et les effets d'autant plus limités.

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le comportement et la sûreté à long terme du stockage et de son environnement

Dans tous les cas de figure (alvéoles B, C et CU), la pression de gaz dans les alvéoles demeure inférieure à la pression de fracturation de la roche (12 MPa) : elle est au maximum de 7 MPa dans les alvéoles B, 6 à 7 MPa dans les alvéoles C et 9 MPa dans les alvéoles CU. A mesure de son évacuation dans le milieu géologique et les galeries du stockage, le gaz voit sa pression décroître dans les alvéoles jusqu'à ne plus lui permettre de migrer sous forme biphasique et *a fortiori* par microfissuration ; il s'évacue alors lentement par diffusion sous forme dissoute.

Le transfert de l'hydrogène dans le Callovo-Oxfordien n'entraîne pas de désaturation significative de la roche (la saturation des argilites est supérieure à 97 % en champ proche et à 99 % en champ lointain). Pendant la phase de production d'hydrogène, la pression de gaz dans les alvéoles induit une augmentation de la pression de l'eau interstitielle des argilites en champ proche qui engendre localement (quelques mètres autour des alvéoles) des gradients hydrauliques. Ceux-ci cessent avec la diminution de la pression et l'évacuation progressive du gaz. Leur extension limitée et la très faible perméabilité de l'argilite font que le transport dominant des solutés demeure toutefois diffusif à l'échelle de la couche du Callovo-Oxfordien.

Après quelques milliers d'années, les flux d'hydrogène diminuent progressivement et la resaturation se poursuit lentement. A l'échelle de plusieurs dizaines de milliers d'années, le stockage n'est pas totalement resaturé, ce qui limite fortement les processus chimiques de dégradation des composants du stockage (béton, argile) qui nécessitent la présence d'eau. La resaturation progressive du stockage en grand s'achève à l'échelle de 100 000 à 200 000 ans après sa fermeture.

1.2.2.3 Après resaturation totale du stockage : un nouvel état d'équilibre hydraulique

Après resaturation totale du stockage, un équilibre hydraulique se met en place dans le stockage et le Callovo-Oxfordien environnant :

- *latéralement*, au-delà de quelques centaines de mètres du stockage, le Callovo-Oxfordien retourne à son état hydraulique initial,
- verticalement, le stockage draine une faible part des écoulements au travers du Callovo-Oxfordien : un écoulement d'eau s'organise le long des ouvrages du stockage et des puits (quelques dizaines à centaines de litres par an), très insuffisant pour entraîner des solutés par convection. La diffusion est le mécanisme de transport dominant des solutés (en particulier des radionucléides) et tout se passe comme à l'état initial avant réalisation du stockage.

C'est dans ce contexte hydraulique que s'effectuent les évolutions chimique et mécanique du stockage et, *in fine*, le relâchement et le transfert des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien.

1.2.3 L'évolution des écoulements et du transport à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années est liée à l'évolution géodynamique

Les évolutions géodynamiques se traduisent par l'érosion progressive des terrains en surface due en particulier aux changements climatiques : leurs effets hydrauliques concernent donc les formations géologiques susjacentes au Callovo-Oxfordien, en particulier l'Oxfordien carbonaté où les écoulements sont modifiés.

Les études sur les changements climatiques futurs dans l'hémisphère nord montrent *une succession de cycles glaciaires* tous les 100 000 ans environ durant le prochain million d'années. Selon la prise en compte ou non d'un effet anthropique (des activités de l'homme), la date d'occurrence du prochain maximum glaciaire varie entre 100 000 ans et 600 000 ans. Durant les maxima glaciaires, les glaciers ne s'installent pas aux latitudes du site étudié et le pergélisol n'atteint pas le Callovo-Oxfordien.



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

Sur le prochain million d'années, les cycles glaciaires et le soulèvement des terrains entraînent *une érosion* de plusieurs dizaines à une centaine de mètres selon la topographie. Cela se traduit, à partir de 300 000 à 500 000 ans, par l'enfoncement des vallées jusqu'à l'Oxfordien et par l'abaissement du niveau des plateaux. A l'est et au sud du secteur, ces modifications topographiques font reculer vers l'ouest et le nord-ouest les zones d'affleurement correspondant aux aires de recharge des formations et abaissent les charges hydrauliques dans les encaissants, notamment l'Oxfordien carbonaté. *Ce n'est donc qu'à l'échelle de 300 000 ans à 500 000 ans que les évolutions géodynamiques modifient progressivement les directions d'écoulement dans les formations encaissantes sus-jacentes* et, de manière moins marquée, dans le Dogger sous-jacent. En particulier dans l'Oxfordien, la direction d'écoulement régionale nord-ouest initiale s'estompe et de nouvelles directions locales apparaissent avec de nouveaux exutoires locaux au niveau des vallées qui se creusent. Cependant, *les vitesses d'écoulement dans les formations carbonatées du Dogger et de l'Oxfordien restent similaires à celles observées actuellement sur la zone de transposition.*

Compte tenu de sa profondeur, la couche du Callovo-Oxfordien n'est pas directement affectée par l'érosion. L'écoulement de l'eau reste similaire à l'actuel (globalement vertical ascendant sur la zone de transposition) mais avec un gradient de charge plus important (compris entre 0,1 et 0,4 m/m) sans modifier cependant le transport des solutés qui reste de type diffusif dominant.

1.3 L'évolution chimique du stockage et de son environnement

Les évolutions thermique et hydraulique du stockage et de son environnement définissent le cadre de son évolution chimique :

- associée aux évolutions hydraulique et thermique, l'évolution chimique détermine le comportement mécanique des composants du stockage. Par exemple, la dégradation chimique des bétons par les eaux du Callovo-Oxfordien altère progressivement les propriétés mécaniques des soutènements des ouvrages du stockage,
- le relâchement des radionucléides par les colis de déchets résulte de processus chimiques, à l'exemple de la corrosion des métaux qui entraîne une perte progressive de l'étanchéité des colis C et CU, et de la dissolution aqueuse du verre qui libère progressivement les radionucléides,
- après relâchement, la solubilité des radionucléides, leur mobilité et leur transfert éventuel dans les argilites du Callovo-Oxfordien dépendent des conditions chimiques environnantes.

L'évolution chimique

Elle provient de déséquilibres de nature :

- chimique : résultant de la mise en interface de matériaux (argilites du Callovo-Oxfordien, métaux des colis C et CU ou déchets B métalliques, béton des colis B et des soutènements, argiles gonflantes des scellements et bouchons, argilites des remblais de galeries, verre des déchets C, matrices d'oxydes d'uranium-plutonium des CU, bitumes des colis...), de composants chimiques ou de fluides de natures différentes,
- thermique : la température est un paramètre important des réactions chimiques et son élévation, due aux colis de déchets exothermiques, affecte surtout le stockage et le Callovo-Oxfordien,
- hydraulique : l'eau est nécessaire au développement des réactions chimiques dont l'extension dépend ensuite, pour beaucoup, des flux d'eau et des échanges de solutés participant à ces réactions.

Les processus chimiques sont surtout des processus d'interface concernant le stockage et le Callovo-Oxfordien en champ proche. Les formations encaissantes sont suffisamment éloignées du stockage pour ne pas en être significativement affectées.

Les propriétés hydrauliques des argilites du Callovo-Oxfordien (très faible perméabilité, faible diffusivité) limitent fortement, pendant la période de non saturation et après la saturation complète du stockage, les flux d'eau dans et autour du stockage. Dans la phase de saturation partielle (premières dizaines de milliers d'années de l'évolution du stockage), la disponibilité réduite de l'eau au contact des composants du stockage limite fortement leur dégradation chimique. Après la resaturation, la progression des réactifs chimiques mis en jeu dans les perturbations chimiques est lente, du fait de leur transport diffusif.

L'évolution chimique est ainsi dominée par des processus très lents de dégradation des bétons, de corrosion des composants métalliques et d'altération des déchets qui conduisent à un lent relâchement des radionucléides.

1.3.1 Les perturbations chimiques limitées affectent principalement le stockage et le Callovo-Oxfordien en champ proche

Les propriétés hydrauliques et chimiques du Callovo-Oxfordien, en particulier sa forte capacité de « tampon chimique », limitent les perturbations dues au stockage et à son environnement proche. Le stockage n'induit pas d'effet chimique sur le Callovo-Oxfordien au-delà de quelques mètres au maximum des ouvrages ; en particulier, la chimie des eaux interstitielles n'est pas modifiée. Compte tenu à la fois de leur éloignement et de la capacité du Callovo-Oxfordien à limiter fortement la progression de ces perturbations, les formations encaissantes ne sont pas affectées par l'évolution chimique du stockage.

Les perturbations chimiques se développent ainsi aux interfaces entre les matériaux du stockage (utilisés dans les alvéoles, les galeries...) et la roche (ou la barrière ouvragée en argile gonflante des alvéoles de CU).

La *perturbation alcaline* des argilites au contact d'ouvrages en béton (galeries et alvéoles de déchets B en particulier) se caractérise par deux zones minéralogiques :

- l'une, reminéralisée par les eaux cimentaires, couvre la zone fracturée de la zone endommagée (extension métrique au plus). Elle induit des propriétés hydrauliques proches de celles des argilites saines, en particulier une perméabilité faible,
- l'autre, faiblement perturbée, conserve également des propriétés hydrauliques et mécaniques similaires à celles des argilites saines.

A l'échelle du Callovo-Oxfordien, les conséquences de la perturbation alcaline sont limitées à une zone d'extension métrique correspondant à la zone fracturée. Les transformations minéralogiques et de la chimie des eaux associées ne sont pas de nature à modifier les processus de migration des radionucléides au sein de la couche.

Performances des scellements et bouchons d'alvéoles en argile gonflante : des perturbations chimiques très limitées

La perturbation alcaline affecte aussi les éléments ouvragés en argile gonflante (bouchon d'alvéole, barrière ouvragée des alvéoles CU, scellements des galeries). Ces interactions sont toutefois limitées et n'altèrent pas les propriétés (très faible perméabilité, capacité de gonflement et de rétention), ni les performances en grand de ces composants.

• Dans les alvéoles C et CU, la perturbation alcaline se développe dans le bouchon en argile gonflante (bentonite) au contact du béton du massif d'appui. Son extension après un million d'années est d'environ 60 cm pour la zone reminéralisée et inférieure à 2 m pour la zone faiblement perturbée. Sur plus de 80 % de sa longueur, le bouchon d'alvéole ne subit aucune perturbation minéralogique susceptible de modifier ses propriétés hydrauliques.

• Pour les scellements d'alvéoles B et de galeries, les bétons de soutènement et de revêtement se dégradent très lentement, sur plusieurs centaines de milliers d'années, entraînant, au niveau du noyau d'argile gonflante et des saignées interceptant la zone endommagée, une perturbation alcaline limitée : les propriétés de gonflement et le rôle hydraulique des saignées sont maintenus à l'échelle du million d'années. La fraction perturbée du noyau d'argile gonflante étant très faible en comparaison de son volume, celui-ci conserve aussi ses propriétés mécaniques et hydrauliques.

L'apport d'oxygène par l'air de ventilation perturbe le contexte chimique des argilites dans les ouvrages ventilés et induit des transformations minéralogiques dues à l'oxydation de certains constituants de la roche (principalement la pyrite et la matière organique) : c'est la *perturbation oxydante*. Sa pénétration dans les argilites n'excède pas quelques centimètres (autour des fractures de la zone endommagée ou à la périphérie des ouvrages) et ne concerne dans cette zone qu'une faible fraction des composants de la roche.

Aux interfaces entre les composants métalliques des alvéoles de déchets C (et de CU) et les argilites du Callovo-Oxfordien (ou la barrière ouvragée en argile gonflante des alvéoles de CU) se développe une perturbation dite fer/argile, due à l'interaction entre le fer et les minéraux argileux de l'argilite (ou des barrières ouvragées en bentonite). Elle est d'extension très limitée (quelques centimètres).

En résumé, les perturbations chimiques engendrées par le stockage sur le Callovo-Oxfordien se limitent pour l'essentiel à une épaisseur inférieure au mètre ou à quelques mètres, peu significative en comparaison de la garde d'épaisseur minimale de 50 m du Callovo-Oxfordien, entre le stockage et ses encaissants carbonatés.

1.3.2 Le relâchement des radionucléides, suite de la lente dégradation des colis, s'effectue dans un environnement chimique favorable à leur immobilisation

Dans les alvéoles B

La dégradation chimique affecte d'abord les bétons du soutènement et du revêtement. Associées aux faibles écoulements d'eau et au lent transfert des solutés dans les argilites, la capacité de « tampon chimique » des bétons et l'épaisseur du revêtement et du soutènement limitent l'avancée des fronts de dégradation chimique vers les colis : ceux-ci restent dans un environnement cimentaire stable durant plusieurs centaines de milliers d'années. Après plusieurs centaines de milliers d'années, la dégradation chimique des matériaux cimentaires par les eaux des argilites affecte une zone proche des parois de l'alvéole et entraîne une chimie des eaux différente de celle du béton sain. Toutefois, la solubilité et la rétention de la majorité des radionucléides ne sont pas significativement modifiées par rapport à celles d'un béton sain. Au cœur de l'alvéole, en particulier au niveau des colis de déchets, des conditions cimentaires saines perdurent ; l'enveloppe béton des colis de stockage est ainsi chimiquement préservée sur plusieurs centaines de milliers d'années.



Schéma de la perturbation alcaline des argilites autour des alvéoles des déchets B et de la dégradation du béton revêtement à 100 000 ans.

C'est donc dans un environnement cimentaire favorable pour les déchets et pérenne que se développe la lente dégradation des colis primaires B : elle s'étale sur plusieurs dizaines de milliers d'années pour les colis de boues bitumées, quelques dizaines de milliers d'années à quelques centaines de milliers d'années pour les colis de déchets technologiques et de coques et embouts. Le relâchement des radionucléides intervient progressivement, dans un environnement chimique propice à l'immobilisation des radionucléides (solubilité et rétention).

Dans les alvéoles C (et CU)

La corrosion des composants métalliques est très lente avec des vitesses de quelques microns par an, voire inférieures. Dans ce contexte, le surconteneur de colis C et le conteneur de CU devraient conserver leur tenue mécanique et leur étanchéité sur des durées bien supérieures à celle recherchée par la conception (4 000 et 10 000 ans respectivement) : de l'ordre de 15 000 ans pour le surconteneur C et 30 000 ans pour le conteneur CU.

Avec la perte d'étanchéité des conteneurs s'amorce le relâchement des radionucléides par les colis de déchets. Pour les déchets C, on retient que la dissolution en milieu argileux se poursuit pendant quelques milliers d'années pour les verres C0 et quelques centaines de milliers d'années environ pour les verres C1, C2, C3 et C4. En dehors de la fraction labile (mobilisable immédiatement), représentant 10 à 35 % de l'inventaire radiologique, la dissolution des assemblages CU (matrices d'oxydes, aciers inoxydables, zircaloy) s'étend sur

plusieurs dizaines à une centaine de milliers d'années si l'on considère un modèle de dissolution radiolytique. Ce dernier est plus pessimiste que le modèle de dissolution classique généralement utilisé au plan international, qui aboutit à une durée de relâchement au-delà du million d'années.

L'eau qui parvient au contact des déchets (et des assemblages de combustibles) présente une composition chimique proche de celle de l'eau interstitielle des argilites (en particulier un caractère réducteur et un pH neutre), favorable à l'immobilisation d'une fraction importante de l'inventaire des radionucléides.

1.4 L'évolution mécanique du stockage et de son environnement

Les évolutions thermique, hydraulique et chimique définissent le cadre de l'évolution mécanique qui constitue une donnée importante pour l'exploitation et l'observation du stockage, tant vis-à-vis de la réalisation des travaux souterrains que des conditions de reprise éventuelle des colis, dans le cadre de la réversibilité. Après la fermeture et à long terme, la dégradation mécanique des colis de déchets participe au relâchement des radionucléides, même si celui-ci est principalement piloté par des processus chimiques. Les propriétés hydrauliques des scellements, des bouchons d'alvéoles et des argilites mécaniquement endommagées dépendent en partie de l'état des contraintes mécaniques dans ces ouvrages. L'évolution mécanique joue ainsi un rôle dans l'organisation des écoulements dans et autour du stockage et le transfert des radionucléides après leur relâchement.

Avant la réalisation du stockage, le Callovo-Oxfordien et le milieu géologique sont à l'équilibre mécanique et l'état de contraintes est stable depuis plusieurs millions d'années. Le stockage provoque localement un déséquilibre et une évolution mécanique liés au creusement des ouvrages (qui entraîne un déconfinement de la roche à leur pourtour), puis aux processus thermiques, hydrauliques et chimiques mis en jeu dans le stockage et le milieu géologique.

La période transitoire avant resaturation totale du stockage contribue à limiter la dégradation chimique des ouvrages et la modification de leurs propriétés mécaniques. Après le retour à l'état saturé, compte tenu de la faiblesse des flux d'eau (dans et autour du stockage) et des lentes vitesses d'écoulement, les processus de dégradation chimique et, par conséquent, les modifications des propriétés mécaniques des composants du stockage sont lents et limités dans l'espace.

Les effets mécaniques liés au stockage sont circonscrits au Callovo-Oxfordien à proximité immédiate des ouvrages. En effet, les distances entre les alvéoles et entre les modules du stockage limitent ou empêchent les interférences mécaniques entre ouvrages. Les effets du creusement dans le Callovo-Oxfordien autour des ouvrages sont limités à une zone maximale de quelques mètres (zone endommagée), à comparer avec la garde d'épaisseur minimale de 50 m de Callovo-Oxfordien entre le stockage et les formations encaissantes (Oxfordien carbonaté, Dogger).

1.4.1 La création autour des ouvrages d'une zone endommagée par le creusement qui a tendance à se cicatriser avec les déformations à long terme des argilites

Le creusement des ouvrages provoque une redistribution des contraintes et des déformations dans les argilites, qui conduisent à la formation d'une zone endommagée (EDZ) dans la roche à proximité immédiate des ouvrages. Cette zone endommagée initiale se caractérise par l'apparition de fissures plus ou moins connectées, et dont la densité décroît avec l'éloignement à la paroi. Elle s'organise en deux zones concentriques : l'une fracturée au contact direct des ouvrages, l'autre microfissurée à sa périphérie.

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le comportement et la sûreté à long terme du stockage et de son environnement



Schéma de l'évolution de l'EDZ autour d'une alvéole de déchets B, de la phase d'exploitation à la phase de post fermeture (premier millier d'années à 10 000 ans)

A 500 m de profondeur (profondeur du niveau médian du Callovo-Oxfordien à l'aplomb du laboratoire), les modélisations indiquent une absence de la zone fracturée. A 630 m de profondeur (profondeur maximale du niveau médian sur la zone de transposition), une zone fracturée apparaît à cause du poids des terrains et des contraintes résultantes : son extension est inférieure à 60 cm environ pour une alvéole B et à quelques centimètres (moins de 5 cm) pour une alvéole C. L'extension de la zone microfissurée est, quant à elle, inférieure à 6 m pour une alvéole de déchets B et à 20 cm pour une alvéole C.

Selon les évaluations actuelles, cet endommagement augmente la perméabilité des argilites par rapport à celle des argilites saines (5.10⁻¹⁴ à - 5.10⁻¹³ m/s) d'un facteur 100 environ pour la zone microfissurée (5.10⁻¹¹ m/s) et d'un facteur 10 000 environ pour la zone fracturée (5.10⁻⁹ m/s).

Le choix de matériaux bien intégrés du point de vue chimique dans le milieu géologique, leurs modes de mise en place et la limitation des vides résiduels dans les ouvrages confèrent à ces derniers une stabilité mécanique globale et évitent une propagation ou une intensification de la zone endommagée initiale.

Durant la phase de saturation partielle du stockage, notamment autour des alvéoles B, des galeries et des puits où les argilites se désaturent, les processus chimiques et mécaniques comme la dégradation des bétons et le fluage des argilites sont ralentis. La désaturation raidit les argilites et peut entraîner leur fissuration hydrique sur une épaisseur limitée à quelques décimètres autour des ouvrages. Ceci n'accroît pas l'extension de la zone endommagée initiale. Avec la resaturation, le gonflement des argilites tend à cicatriser cette fissuration hydrique. A long terme, le caractère progressif du chargement mécanique des alvéoles (fluage des argilites), le faible taux de vide dans ces ouvrages et la lente dégradation chimique de leurs composants n'induisent pas de rupture brutale des ouvrages : *leur évolution mécanique est progressive durant plusieurs milliers d'années et ne provoque pas de propagation ou d'intensification de la zone endommagée*.

Autour des alvéoles C et CU, l'élévation de la température dans les argilites durant les premières dizaines d'années après la mise en place des colis entraîne des contraintes thermomécaniques qui, à la périphérie des alvéoles, peuvent conduire à une zone fracturée d'extension maximale d'une dizaine de centimètres. Au niveau du bouchon d'alvéole, la minimisation des jeux et le gonflement de la bentonite (effectif en quelques années à quelques dizaines d'années) ainsi qu'une température plus limitée (moins de 70°C) ne conduisent pas au développement d'une zone fracturée. Au-delà de cette phase thermique, le retour à un champ de contraintes naturel conduit à retrouver la zone endommagée initiale.
A long terme (quelques dizaines de milliers d'années), la déformation différée des argilites se traduit par une mise en charge progressive des ouvrages souterrains. Les soutènements de ces ouvrages puis, à plus long terme, les matériaux remplissant ces excavations permettent de reprendre les contraintes. Le fluage, accompagné par la resaturation des argilites, conduit à fermer la fracturation éventuelle de la roche et à comprimer la microfracturation de la zone endommagée. *Cette cicatrisation progressive de la roche tend à restaurer des perméabilités proches de celles de la roche saine.* Au niveau des scellements d'alvéoles de déchets B et de galeries, la réalisation d'ancrages (saignées remplies d'argile gonflante) permet d'intercepter la totalité de la zone fracturée et ainsi de rétablir la continuité du milieu.

1.4.2 Les ouvrages souterrains sont stables mécaniquement à l'échelle de plusieurs siècles à quelques milliers d'années

Sur la durée d'exploitation et de réversibilité du stockage, l'état non saturé du stockage s'accompagne du ralentissement, voire de l'arrêt, du fluage des argilites et de l'absence de dégradation chimique (ou d'une dégradation très limitée) des composants des ouvrages.

L'évolution mécanique des ouvrages est limitée et leur stabilité assurée :

- les alvéoles B et les galeries ne sont totalement saturées qu'après plusieurs dizaines de milliers d'années. L'absence de saturation limite la dégradation chimique des bétons de revêtement par les eaux des argilites et préserve les propriétés mécaniques des composants. De même, la désaturation des argilites autour des ouvrages ralentit, voire bloque, le fluage des argilites, limitant aussi la mise en charge des revêtements qui garantissent la stabilité mécanique des ouvrages. La reprise du fluage des argilites avec leur resaturation progressive engendre des contraintes sur les revêtements qui n'atteignent pas leur seuil de résistance avant quelques centaines à quelques milliers d'années, ce qui assure la stabilité des ouvrages sur ces durées,
- autour des alvéoles C et CU, non ventilées durant l'exploitation, les argilites sont saturées. La saturation des barrières ouvragées des alvéoles CU est atteinte après quelques centaines d'années. Le fluage des argilites et le gonflement des argiles gonflantes de la barrière ouvragée permettent la reprise des jeux fonctionnels autour des alvéoles au cours de cette même période. Du fait de la progression lente de leur corrosion, les revêtements et chemisages métalliques conservent leur intégrité mécanique pendant au moins quelques centaines d'années, ce qui garantit la stabilité des ouvrages sur ces mêmes durées.



Courbe de mise en charge du revêtement des alvéoles B par le fluage des argilites

1.4.3 La lente évolution mécanique du stockage sur quelques centaines de milliers d'années

Après saturation complète du stockage, son évolution mécanique est pilotée par les lents processus de dégradation chimique de ses composants, le fluage des argilites et les propriétés de gonflement des argiles gonflantes.

Lors de la fermeture, les ouvrages (galeries essentiellement) sont comblés pour limiter au maximum les vides résiduels. Les matériaux utilisés présentent des propriétés de gonflement (scellements) et une raideur suffisantes (remblais) pour s'opposer aux contraintes venant du milieu géologique. Les propriétés des matériaux ne sont pas ou peu affectées par les processus chimiques qui, au contraire, améliorent parfois le comblement des ouvrages (par exemple l'expansion des produits de corrosion) ou leur rigidité (la dégradation chimique des bétons conduisant *in fine* à leur calcification). En offrant une résistance au fluage à long terme des argilites, ce remblaiement évite les déformations en grand ou une fracturation des argilites et permet le retour à un état de contraintes mécaniques homogène.

A l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années, l'érosion associée aux changements climatiques attendus sur le million d'années et la géodynamique interne (surrections et séismes) ne sont pas susceptibles de modifier significativement le champ de contraintes naturel en grand, ni de provoquer des déformations du milieu géologique du stockage. Dans les zones soumises à l'érosion, la décharge progressive des terrains érodés diminue localement la contrainte verticale. Cette diminution est sans effet sur le comportement mécanique des formations géologiques, en particulier sur le Callovo-Oxfordien et le stockage.

1.5 Les points marquants de l'évolution du stockage vis-à-vis du relâchement et du transfert des radionucléides

Sur le long terme, la dégradation des colis de déchets conduit au relâchement des radionucléides dans les alvéoles de stockage : il se fait directement avec l'arrivée de l'eau ou à mesure de l'altération par l'eau des déchets ou de leur matrice, à l'exemple de la dissolution aqueuse de la matrice en verre.

Les environnements chimiques rencontrés par les radionucléides déterminent leur solubilité et leur rétention. Une part importante des radionucléides est immobilisée en champ proche et ne migre pas. Les radionucléides qui peuvent migrer hors des alvéoles le font très lentement par diffusion. Une très faible part des radionucléides atteint finalement les encaissants après diffusion dans les argilites du Callovo-Oxfordien.

1.5.1 Un relâchement des radionucléides hors du stockage lent et limité

1.5.1.1 La période non saturée du stockage

Tant que les alvéoles ne sont pas saturées, les déchets sont préservés d'une arrivée d'eau. Les radionucléides non gazeux restent confinés dans leurs matrices et dans les éléments qui composent les déchets.

Certains colis B libèrent toutefois des traces de radionucléides gazeux qui peuvent migrer en champ proche sous forme gazeuse dans la zone non saturée. Le tritium et l'argon 39, qui ont une durée de vie très courte, disparaissent en un millier d'années environ, avant la fin de la resaturation, et ne sortent pas du stockage. Le carbone 14, le krypton 85 et le chlore 36 de période plus longue se dissolvent en champ proche dans les eaux interstitielles avec la resaturation et peuvent alors migrer sous forme dissoute. La part de carbone 14 susceptible de migrer sous forme gazeuse est très réduite (de l'ordre d'un m³) ; elle se disperse dans le milieu géologique, sans impact, les temps de transfert étant très supérieurs à sa période radioactive (5 700 ans).

1.5.1.2 La lente dégradation des colis de stockage

Avec la resaturation des alvéoles de stockage s'amorce la lente dégradation des colis de stockage et le relâchement consécutif des radionucléides.



Corrosion : vue au microscope à balayage électronique

· La lente dégradation chimique des colis B dans les alvéoles

La dégradation des colis B ne s'amorce significativement qu'avec la resaturation des alvéoles qui intervient au-delà de plusieurs dizaines de milliers d'années. Selon les modèles conservatifs utilisés à ce jour, la majorité des déchets présents dans les colis B se dégrade progressivement sur des durées s'échelonnant entre quelques dizaines de milliers d'années après l'arrivée de l'eau pour les déchets métalliques (aciers noirs, acier inoxydable...) et les boues bitumées (B2), et quelques centaines de milliers d'années pour d'autres déchets métalliques (alliage de zirconium). Seuls les éléments localisés en surface des déchets sont susceptibles d'être relâchés dès l'arrivée de l'eau.

• La faible cinétique de corrosion des conteneurages métalliques des colis C et CU et la lente dissolution aqueuse des verres (C) et des matrices d'oxyde (CU)

Dans les alvéoles C et CU, le relâchement des radionucléides débute après la perte d'étanchéité des conteneurs (estimée de manière

prudente à 4 000 ans pour le surconteneur C et à 10 000 ans pour le conteneur CU). Après la perte d'étanchéité des conteneurages, l'arrivée d'eau au sein des colis initie le processus de dissolution des matrices d'oxyde et du verre ainsi que le relâchement des radionucléides.

Les modèles d'altération des verres constituant les déchets C conduisent à une dissolution pendant quelques centaines de milliers d'années pour les verres C1, C2, C3 et C4. Pour les verres anciens C0, le modèle proposé à ce stade conduit à une dissolution sur quelques milliers d'années. La dissolution des matrices d'oxyde de CU s'effectue, quant à elle, à l'échelle de plusieurs dizaines de milliers d'années à une centaine de milliers d'années, si l'on considère par prudence un modèle de dissolution radiolytique, et sur plus d'un million d'années si l'on tient compte d'un modèle de dissolution classique. Par ailleurs, les gaines et matériaux de structure des CU se corrodent lentement sur des durées qui dépendent de la géométrie des pièces.

1.5.1.3 Les alvéoles de stockage : des environnements physico-chimiques évoluant peu, qui contribuent à une faible mobilité des radionucléides

Les environnements physico-chimiques des alvéoles (B, C et CU) rencontrés par les radionucléides lors de leur relâchement conduisent à une forte rétention et à une faible solubilité de la plupart d'entre eux. Ceux-ci sont adsorbés (piégés) ou précipitent au sein des alvéoles. Combinés à un transport diffusif lent, ces phénomènes conduisent à *des temps de transfert suffisamment longs pour permettre une forte disparition de la majorité des radionucléides par décroissance radioactive au sein des alvéoles.* Seuls quelques radionucléides mobiles à vie longue, comme l'iode 129, le chlore 36, le césium 135, le carbone 14, le calcium 41, le sélénium 79 et des toxiques comme le bore, migrent significativement hors des alvéoles.

Radionucléides : des comportements spécifiques en terme de solubilité et de rétention

Les radionucléides se répartissent en trois grandes familles en terme de solubilité et de rétention en milieux argileux (argilites du Callovo-Oxfordien, bentonite de composants ouvragés, remblais à base d'argilites) ou en milieu cimentaire (alvéoles B) :

- *les éléments « mobiles »* dont la solubilité est élevée et la rétention faible ou nulle, par exemple l'iode ou le chlore,
- *les éléments « moyennement mobiles »* dont la solubilité est élevée et la rétention forte, par exemple le césium,
- *les éléments « très peu mobiles »* dont la solubilité est faible et la rétention forte, par exemple les actinides comme l'uranium ou le plutonium et les lanthanides comme le samarium ou l'europium.

L'inventaire radiologique des colis de déchets comporte surtout des éléments des deux dernières familles.

6

1.5.2 Le Callovo-Oxfordien : la limitation du transfert des radionucléides les plus mobiles

Sur le million d'années, le transport des radionucléides dans les argilites du Callovo-Oxfordien est dominé par la diffusion : les transferts sont lents et il faut au moins une centaine de milliers d'années aux radionucléides mobiles pour parvenir aux limites du Callovo-Oxfordien (50 m au moins de part et d'autre d'un stockage implanté au milieu de la formation). La moitié des radionucléides relâchés se dirige vers le bas (Dogger), l'autre moitié vers le haut (Oxfordien).

Les temps de migration sont à comparer aux périodes de décroissance radioactive des radionucléides susceptibles de migrer (solubles, et non ou peu retardés), notamment du carbone 14 (période de 5730 ans), du sélénium 79 (période de 65000 ans) et du chlore 36 (période de 300000 ans).

Ainsi, seule une très faible partie de l'inventaire des radionucléides et des toxiques chimiques contenus dans les déchets est susceptible de se retrouver dans les aquifères encaissants au cours du prochain million d'années : l'iode 129, le chlore 36 et, dans une moindre mesure, le sélénium 79, le calcium 41, le bore stable.

Les autres radionucléides, peu solubles et fortement retenus par les argilites comme les actinides, demeurent confinés au sein du Callovo-Oxfordien : leur très lent transfert diffusif combiné à leur décroissance radioactive conduit à leur migration sur quelques mètres au maximum autour du stockage en un million d'années.



Illustration du phénomène de diffusion au sein du Callovo-Oxfordien à l'aide de traceurs naturels (profil de la composition isotopique de l'oxygène de l'eau porale). A droite, modélisation de la diffusion.

1.5.3 Le transfert des radionucléides dans les encaissants

Les radionucléides parvenus aux limites du Callovo-Oxfordien migrent dans les formations carbonatées du Dogger et de l'Oxfordien, à la fois par convection et dispersion, et se déplacent vers les exutoires naturels.

Dans le Dogger, les radionucléides progressent horizontalement vers l'ouest-sud-ouest à très faible vitesse, jusqu'à des distances de quelques kilomètres à l'échelle du million d'années.

Dans les encaissants supérieurs, les trajectoires évoluent avec les changements hydrogéologiques induits par les évolutions de surface. Au cours des premiers 100 000 ans, les écoulements sont comparables au régime actuel, définissant un exutoire naturel dans la vallée de la Marne à l'ouest du site du laboratoire et des trajectoires d'extension régionale vers le nord-ouest. Ils se modifient progressivement, et après 500 000 ans, l'érosion de surface a modifié les directions principales d'écoulement. L'exutoire dans la vallée de la Marne est conservé mais les trajectoires régionales disparaissent au profit d'un second exutoire local au nord du site dans la vallée de l'Ornain.

2. L'évaluation de la sûreté à long terme du stockage

La démarche de sûreté se fonde en premier lieu sur le comportement du stockage tel qu'il peut être décrit au vu des connaissances scientifiques acquises. Elle s'attache à formaliser ces connaissances dans le cadre d'un modèle de sûreté qui propose une représentation simplifiée, mais prudente, des phénomènes et de leur déroulement dans le temps. Elle teste également les limites de validité de cette représentation en évaluant les conséquences qu'aurait la variation de certaines données. Plus avant, elle s'attache aussi à traiter des situations qui échappent à l'évolution telle qu'elle était prévue ou envisagée par le concepteur du stockage.

Ce travail débouche, *in fine*, sur des évaluations quantitatives de la performance globale, notamment sous forme d'indicateurs caractérisant l'impact éventuel du stockage sur l'homme et l'environnement. Il porte un jugement sur la validité des fonctions de sûreté initialement imparties au stockage et constitue un test de la robustesse d'ensemble du système. En ce sens, l'évaluation de performance constitue une validation *a posteriori* de la conception, en assurant que les fonctions attribuées aux différents composants du stockage par la sûreté sont effectivement remplies. Elle témoigne aussi de l'existence d'une représentation simple du stockage et de son évolution, ce qui est une condition importante de la confiance dans le processus d'évaluation.

Enfin, une démarche de sûreté s'inscrit nécessairement dans une approche itérative et de progrès. En mettant en perspective les différents phénomènes et en jaugeant leur importance quantitative, elle contribue à évaluer leur poids relatif et les conséquences des éventuelles incertitudes qui subsistent. Elle oriente également les recherches ultérieures en mettant en lumière les domaines où des avancées scientifiques contribueraient le plus fortement à la sûreté.

2.1 De la compréhension des phénomènes au calcul de sûreté

Les études et recherches apportent une connaissance détaillée des propriétés et du comportement des différents composants du stockage (colis de déchets, matériaux, milieu géologique). Cela permet de proposer une vision de l'ensemble des phénomènes susceptibles de se faire jour (corrosion, évolution mécanique des ouvrages, saturation, évolution chimique...).

La démarche de sûreté intègre ces différents éléments pour construire une histoire simplifiée et cohérente de l'évolution du stockage, en retenant des hypothèses prudentes et des simplifications allant dans le sens du conservatisme. Cette histoire constitue un scénario qui ne prétend pas représenter la réalité telle qu'elle se déroulera, mais entend englober l'éventail de situations probables susceptibles de se produire, avec l'assurance qu'il constitue une vision conservative, voire pénalisante. Ce scénario constitue la base d'une évaluation guantifiée au moyen de calculs de sûreté.

2.1.1 Objectif de l'évaluation

S'appuyant sur la compréhension des phénomènes et du comportement du stockage dans le temps, l'objectif est d'évaluer ses performances, c'est-à-dire analyser la manière dont le milieu naturel et les composants conçus par l'homme garantissent les objectifs de sûreté à long terme. Cela se traduit notamment *in fine* par l'évaluation d'un impact radiologique sous forme d'une dose à laquelle pourrait être exposé le public.

L'impact du stockage sur l'homme et l'environnement doit répondre à des normes de radioprotection strictes. Les objectifs à retenir sont indiqués par la Règle fondamentale de sûreté RFS III.2.f pour une période de 10 000 ans au moins, avec une valeur de 0,25 mSv par an, soit un quart de la dose admissible pour le public due aux expositions d'origine non naturelle et environ un dixième de la dose reçue par an du fait de la radioactivité naturelle. Au-delà de 10 000 ans se pose la question de la durée sur laquelle conduire les calculs. La pratique internationale conduit à retenir une durée d'un million d'années. Elle constitue en effet une constante de temps représentative du processus de décroissance de la radioactivité et de l'évolution du stockage. Au-delà du million d'années, ce dernier évolue en effet très peu. Par ailleurs, le maximum atteint par l'impact se situe en-

deçà de cette durée. Bien que fort longue, une telle durée est compatible avec les connaissances disponibles sur le milieu géologique qui a montré sa stabilité sur des durées supérieures.

Toxiques chimiques

L'évaluation vise également à s'assurer de l'absence d'impact des toxiques chimiques présents dans les déchets, en appréciant leur migration éventuelle jusque dans l'environnement à l'échelle du million d'années, selon des modalités similaires à celles utilisées pour les radionucléides.

2.1.2 Comment évalue-t-on l'impact ?

Selon les prescriptions de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) et en accord avec les recommandations de la Règle fondamentale de sûreté RFS III.2.f, la mesure de l'impact radiologique est effectuée par le calcul de la dose individuelle engagée sur le groupe critique, c'est-à-dire les individus susceptibles de recevoir la dose la plus élevée par exposition à la radioactivité issue de l'installation considérée.



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

Le groupe critique

Il est défini en se fondant sur l'étude des modes de vie des populations environnant le site considéré. Cela aboutit à définir un ou plusieurs groupe(s) « de référence ». La seule connaissance de la quantité de radioactivité présente dans l'environnement ne permet toutefois pas de disposer immédiatement d'une dose. Il est nécessaire de faire des hypothèses sur la manière dont les radionucléides présents pourraient atteindre l'homme, notamment au travers de la chaîne alimentaire.

Une telle évaluation présente des difficultés spécifiques quand elle est pratiquée sur une durée de l'ordre du million d'années. A cette échelle, il est illusoire de prétendre disposer d'une évaluation précise des modes de vie dans le secteur étudié. La définition du groupe de référence, qualifié de « groupe critique » dans un tel contexte, s'appuie donc sur des hypothèses simplifiées et très pessimistes, supposant que des groupes humains de taille réduite vivent à proximité du stockage en tirant l'essentiel de leur subsistance de productions locales (légumes, animaux domestiques, eau). Ainsi, le groupe critique est conventionnel, mais les pratiques qui lui sont attribuées garantissent qu'il constitue une mesure extrêmement prudente de la dose à laquelle la population serait exposée.

A l'échelle de temps du million d'années retenue pour l'évaluation de sûreté, les conditions d'environnement, en particulier climatiques, sont soumises à des variations. Les études actuelles permettent d'en prédire les grandes caractéristiques, au moins sous forme d'hypothèses générales.

Un dernier élément est nécessaire à l'évaluation d'impact : la définition d'exutoires, en d'autres termes les lieux où la radioactivité peut atteindre l'environnement. Le vecteur principal de transport de la radioactivité étant l'eau, il peut s'agir de cours d'eaux, de nappes d'eau souterraines, de forages d'alimentation en eau. La détermination de ces exutoires passe par la représentation de l'évolution du milieu géologique et des trajectoires empruntées par la radioactivité depuis le stockage.

Le calcul d'un impact sous forme de dose constitue l'outil de référence privilégié au plan international. D'autres indicateurs sont aussi définis pour compléter la compréhension du niveau de sûreté atteint par les concepts de stockage. A titre d'exemple, les flux évalués à la sortie de la formation du Callovo-Oxfordien permettent de préciser le jugement porté sur ses qualités de confinement. Toutefois, ces indicateurs n'expriment que des quantités physiques de radioactivité et ne peuvent être mis en relation avec des seuils réglementaires ou recommandés.

Les indicateurs dans la démarche de sûreté

L'analyse des résultats ne consiste pas uniquement à comparer la dose à l'exutoire à la valeur réglementaire de 0,25 mSv par an. Elle s'appuie également sur divers indicateurs intermédiaires qui permettent :

- de comprendre le fonctionnement individuel de chacune des barrières vis-à-vis des transferts et d'évaluer leurs performances au regard des fonctions qui leur sont allouées,
- de s'affranchir de certaines incertitudes. Par exemple, un indicateur « flux de radionucléides à la sortie de la formation-hôte » est, au contraire de la dose, indépendant des incertitudes sur les formations encaissantes.

Les indicateurs utilisés sont notamment :

- la répartition en pourcentage entre les flux convectifs et diffusifs dans le stockage et dans le Callovo-Oxfordien. Ces indicateurs sont utilisés pour évaluer les performances associées à la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » mais également, indirectement, celles relatives à la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser à l'intérieur du stockage »,
- les quantités d'activité émises ou relâchées par les colis, les ouvrages, la formation-hôte et aux exutoires sur la durée de l'analyse par rapport à la quantité initiale présente dans les colis. Cet indicateur est également approprié pour évaluer les fonctions « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser à l'intérieur du stockage » et « retarder et atténuer la migration des radionucléides »,
- les débits d'activité au cours du temps à la sortie de chacun des composants représentés (le colis, l'alvéole, les scellements, la formation-hôte, les exutoires potentiels). Ces débits d'activité permettent, entre autres, d'estimer la capacité d'atténuation des différentes barrières de confinement, en particulier barrière géologique. Cet indicateur permet d'apprécier les performances de la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides »,
- la cartographie des concentrations en solution dans la formation-hôte et dans les formations encaissantes, notamment dans les horizons aquifères. Ces cartographies permettent de visualiser, à différentes dates, le cheminement de la radioactivité et des toxiques dans les formations encaissantes.

Par rapport aux valeurs limites d'impact, on distingue deux types de situations :

- l'évolution normale du stockage, c'est-à-dire la situation jugée la plus probable ou reflétant un comportement du stockage conforme à ce qui est attendu par ses concepteurs. Dans ce cas, pour disposer d'une approche robuste, il est recommandé que l'évaluation de la dose soit conduite dans des conditions qui garantissent son caractère pessimiste. La valeur de 0,25 mSv par an est alors retenue comme seuil de référence ;
- des situations altérées qui recouvrent des situations peu probables. Dans ce cas, l'impact calculé s'apprécie non seulement en valeur absolue mais aussi en fonction de la vraisemblance de la situation, du caractère chronique ou ponctuel des expositions. Il est possible, dans de telles situations, de rencontrer des évaluations de dose qui dépassent le seuil de 0,25 mSv par an, mais qui sont considérées comme acceptables au regard de leur faible probabilité.

2.1.3 La notion de scénario et la démarche de modélisation

Malgré les acquis de la recherche, on ne peut prétendre décrire pas à pas l'évolution détaillée du stockage sur un million d'années en faisant droit à la complexité de tous les phénomènes. En effet, dans de telles conditions, les calculs de sûreté visant à déterminer l'impact ne pourraient être conduits, compte tenu des moyens de simulation actuels. Par ailleurs, des incertitudes subsistent sur certains paramètres ou modèles.

Pour évaluer l'impact du stockage, la démarche consiste donc à représenter son évolution sous une forme simplifiée, que l'on désigne sous le terme de scénario. Ce dernier ne vise pas à décrire de manière exhaustive l'évolution du stockage mais, au contraire, à offrir une vision plus aisément compréhensible avec une représentation des phénomènes conduisant à donner une valeur haute ou majorante de l'impact engendré par le stockage. Tous les phénomènes présents au cours de l'évolution du stockage ne sont pas nécessairement représentés. Ils ne sont pas pour autant négligés ou ignorés par l'analyse de sûreté. Ce sont les enseignements des études préparatoires aux calculs de sûreté qui conduisent à ne pas les représenter ou à les représenter de manière simplifiée. Le scénario ainsi défini n'est donc pas une représentation fidèle de l'évolution, ni une prédiction de ce qui adviendra. Il est bâti de telle sorte qu'en situation normale, le devenir du stockage engendre un impact inférieur à celui évalué par ce scénario. On dit que l'on néglige les « marges de sûreté », c'est-à-dire les données favorables, bien que non complètement déterminées, qui jouent en faveur de la sûreté du stockage. Ce scénario est qualifié de scénario d'évolution normale (SEN).



La seconde étape après la définition du scénario consiste à le modéliser pour permettre le calcul de l'impact associé. Cela appelle des choix pour disposer d'un modèle robuste qui tienne compte des incertitudes pouvant exister quant à la représentation des phénomènes ou aux valeurs de paramètres physiques. Ils visent à disposer d'un modèle d'ensemble utilisable pour les calculs et l'évaluation de performances, tout en assurant la cohérence avec les objectifs de l'évaluation de sûreté et de la définition du scénario d'évolution normale. Cela conduit à la définition du « modèle de calcul de sûreté » ou « modèle de sûreté ». Les choix opérés sont retracés de manière à pouvoir, le cas échéant, revenir sur ces derniers.

Démarche de modélisation

Au stade de la compréhension du système, on utilise des modèles scientifiques plus ou moins complexes qui rendent compte de chaque processus au sein du stockage et de son environnement. Pour se doter d'une première représentation du système et permettre d'apprécier les paramètres prépondérants, on dérive de la connaissance acquise des modèles conceptuels qui constituent une approche simplifiée, mais robuste, rendant compte des principaux déterminants. Ces modèles sont utilisés dans les calculs préparatoires permettant de jauger l'impact des différents phénomènes et de décider des simplifications possibles, par exemple en négligeant un phénomène devant un autre, dominant.

Enfin, la représentation complète du système est réalisée dans le cadre du modèle de sûreté qui traduit le scénario d'évolution normal et constitue lui-même une simplification par rapport aux modèles conceptuels. Cette simplification tient compte des résultats des calculs préparatoires.

On distingue ainsi les modèles et paramètres qui traduisent le mieux la réalité physique telle qu'elle est appréhendée et ceux qui ont vocation à donner une représentation pessimiste (ceux-ci sont qualifiés de « conservatifs » ou « pénalisants » selon le degré de pessimisme). La stratégie de choix des modèles obéit aux principes suivants :

- en cas d'incertitude faible, on retient le modèle le plus étayé scientifiquement (modèle « phénoménologique »),
- en cas d'incertitude forte, on retient un modèle ou une valeur conservative ou pénalisante,
- on privilégie les modèles plus simples et robustes, dès lors que ce choix ne conduit pas à sous-estimer l'impact.

La notion d'incertitude « faible ou forte » comporte inévitablement une part de subjectivité, bien qu'elle puisse se traduire dans certains cas par des considérations d'ordre statistique (dispersion des valeurs expérimentales, taux de confiance, etc.). Le jugement porté sur l'incertitude est discuté au cas par cas par les experts qui proposent les valeurs et les modèles. En cohérence avec les recommandations du groupe de revue internationale qui avait examiné les travaux de l'Andra en 2003, la démarche retenue présente une description aussi précise que possible des choix opérés et de leur motivation afin que le lien entre modèles conceptuels et modèle de calcul de sûreté soit le plus explicite possible.

Différents types de modèles et de valeurs

• phénoménologique (aussi appelé « *best estimate* ») : modèle jugé comme permettant d'obtenir, tout autre paramètre fixé par ailleurs, la meilleure adéquation entre les résultats du modèle et les résultats de la mesure. Ce choix est effectué a priori indépendamment d'une référence à l'impact éventuel. Un modèle ou une valeur phénoménologique doit s'appuyer sur un nombre représentatif de mesures et un raisonnement physique montrant que cette valeur est la plus représentative en se fondant sur des informations fiables.

• **conservatif** : modèle qui permet d'obtenir un impact calculé qui se situe dans une gamme de valeurs hautes (tout autre paramètre étant fixé par ailleurs). Dans le cas le plus simple, où l'impact varie de manière croissante (respectivement décroissante) lorsque la valeur du paramètre croît, on choisit une valeur dans la plage haute (respectivement basse) des valeurs disponibles. En l'absence de mesures, on s'appuie sur les données disponibles à l'international dès lors qu'elles sont suffisamment explicites dans la littérature et transposables au cas traité.

• pénalisant : modèle ne se référant pas à un état des connaissances phénoménologiques, mais choisi de manière conventionnelle comme conduisant de manière certaine à un impact supérieur à ceux qui seraient calculés avec des valeurs possibles. Cela peut, par exemple, correspondre à une limite physique.

Afin de compléter le traitement du scénario d'évolution normale, d'autres calculs sont effectués. Ce sont les analyses de sensibilité sur le modèle de sûreté. Elles entendent tester des jeux de paramètres ou des modèles différents de ceux retenus comme les plus représentatifs : valeurs extrêmes de certains paramètres correspondant à des situations très pénalisantes, mais aussi valeurs plus favorables. Dans tous les cas, l'objectif est de mesurer l'impact de ces variations et de préciser s'il y a matière à une étude plus approfondie, soit pour gagner des marges de sûreté, soit pour réduire encore certaines incertitudes. Cela permet aussi d'apprécier l'importance respective des différents paramètres.

2.1.4 La maîtrise des incertitudes

L'évaluation de sûreté et l'atteinte des objectifs de sûreté sont indissociables de l'identification et du traitement des incertitudes. En règle générale, l'incertitude naît d'un manque de données ou de connaissances précises sur un des éléments du système étudié, ou du caractère aléatoire de certains phénomènes. Dans le cas de l'analyse du stockage en formation géologique profonde, cela peut recouvrir des lacunes sur la valeur de paramètres, la compréhension partielle de certains mécanismes couplés, la difficulté à prévoir la survenue de certains événements dans la longue durée.

On peut distinguer :

- les incertitudes portant sur les caractéristiques intrinsèques d'un composant du stockage. Elles peuvent être liées aux imprécisions des techniques de mesure, à la variabilité du composant dans l'espace ou au modèle qui sous-tend la définition de la grandeur que l'on cherche à caractériser,
- les incertitudes technologiques. Au stade de la faisabilité, les dispositions technologiques à mettre en œuvre ne sont pas figées et des options existent entre différentes solutions qui peuvent ne pas avoir toutes les mêmes conséquences sur la sûreté à long terme du stockage. Par ailleurs, dans le cadre d'une gestion par



étape du stockage, il est peu probable que, même une fois le stockage défini plus complètement, il demeure exploité sur toute sa durée attendue de la même manière,

- les incertitudes sur les processus régissant l'évolution du stockage. Une fois acquises les données concernant l'ensemble des composants du système, il demeure à comprendre et à représenter la manière dont ces différents éléments entrent en relation et agissent sur l'évolution du système. La représentation fait appel à des modèles ; elle est entachée d'incertitudes dans la mesure où elle procède par simplification par rapport à une représentation plus détaillée des phénomènes et où elle nécessite des extrapolations dans le temps et dans l'espace. C'est particulièrement le cas pour les phénomènes couplés, généralement plus difficiles à représenter,
- les événements qui peuvent survenir dans l'environnement du stockage. On distingue en général les phénomènes d'origine naturelle se produisant à la surface (événements climatiques, tectoniques, etc.), qui sont prédictibles dans leur principe mais souvent entachés de grandes incertitudes, et les événements dus à l'action de l'homme (intrusion, effets anthropiques) qui sont dans la plupart des cas imprévisibles au-delà d'une échéance raisonnable. Des approches partiellement conventionnelles sont retenues classiquement pour limiter l'impact des incertitudes à prendre en compte. Conformément à la RFS III.2.f, on suppose en particulier que le comportement humain futur sera globalement le même qu'aujourd'hui.

Une incertitude ou un risque concerne la sûreté s'il peut remettre en cause l'évaluation de la performance du stockage. La prise en compte des risques et des incertitudes passe par des modalités différentes :

- la première, privilégiée chaque fois que possible, est la maîtrise des incertitudes, c'est-à-dire leur prise en compte dans la conception même du stockage par la définition de dispositions de conception qui rendent le système robuste face à l'incertitude en question,
- la deuxième est l'intégration du risque, ou de l'incertitude, dans l'évaluation des performances du stockage, en effectuant un choix pénalisant, soit dans le calcul de référence, soit dans les calculs de sensibilité,
- pour les incertitudes qui ne peuvent être abordées par les deux méthodes précédentes, on doit identifier quelle séquence d'événements, constituant une situation altérée, serait induite par le risque en question et en évaluer les conséquences. Il convient alors de s'assurer que la vraisemblance de cette situation est faible. Comme il n'est pas possible d'évaluer individuellement toutes les situations altérées concevables, celles-ci sont regroupées par famille de situations similaires. Chaque famille est rattachée à un scénario d'évolution altérée qui décrit une configuration, dont les effets sont similaires à ceux des situations qu'il entend représenter, et dont les conséquences sont plus graves. Un scénario d'évolution altérée (SEA) représente ainsi une situation « enveloppe » de situations altérées *a priori* diverses, mais induisant des effets similaires.

2.1.5 Les outils de simulation et de calcul

Après la définition du modèle de sûreté global, lui-même composé de nombreux modèles élémentaires, la dernière étape consiste en la mise en œuvre de ce dernier au moyen de logiciels et de codes numériques spécifiques qui réalisent effectivement les calculs. L'Andra a utilisé des codes dédiés aux différents phénomènes (transport, hydraulique, thermique, etc.) et intégrés au sein de la plate-forme de simulation ALLIANCES co-développée avec le CEA.

Plateforme de simulation ALLIANCES

La plateforme ALLIANCES met à disposition des chercheurs et des ingénieurs un outil à même de réaliser les évaluations de sûreté en prenant en compte les spécificités d'un tel travail :

- la nécessité de maîtriser un très grand nombre de données,
- le besoin de réaliser des enchaînements de calcul complexes faisant intervenir des modèles différents,
- un volume particulièrement important de calculs (plusieurs milliers de simulations),
- une exigence de maîtrise des données et des résultats afin de pouvoir conduire des analyses sur chaque paramètre.

L'autre objectif principal d'ALLIANCES est de s'affranchir des difficultés numériques dans le couplage des codes. En effet, le chaînage d'un code à un autre peut causer des artefacts d'ordre numérique si l'on ne veille pas à la cohérence d'ensemble. L'atout de la plate-forme est de constituer un atelier logiciel où est réalisée la vérification de cohérence.

Enfin, la plate-forme autorise également la réalisation de comparaisons entre divers logiciels. Elle teste ainsi la cohérence des résultats obtenus et constitue une garantie supplémentaire pour la fiabilité des données.

Les capacités de modélisation de la version plateforme d'ALLIANCES sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Modèles	Composants	Exemples d'application
Hydraulique - saturée - insaturée - transitoire	Castem Porflow Traces	 écoulement dans les milieux poreux resaturation des alvéoles de stockage
Transport - simple - étendu	Castem Porflow Traces	 transport de contaminant (toxiques chimiques ou radionucléides)
Chimie - complexation - échange d'ions	Chess PhreeqC	 lixiviation pertubation alcaline pertubation oxydante vieillissement relâchement
Transport Chimie	Castem MT3D Traces Chess PhreeqC	 lixiviation pertubation alcaline pertubation oxydante vieillissement relâchement
Colis - verre - bitume	Prediver Colonbo	- dégradation des colis - relâchement
Sensibilité - échantillonnage - analyse	LHS Kalif Pastis	Sensibilités aux caractéristiques hydrauliques et de transport pour les évaluations de sûreté

Au cours des années 2004 et 2005, ALLIANCES a été exploitée de façon opérationnelle par l'Andra et ses partenaires pour effectuer les calculs de sûreté et réaliser des études de performance. L'ensemble de ces travaux représente plusieurs milliers de calculs. Ils n'ont donné lieu qu'à un nombre très minime d'incidents, témoignant ainsi de la bonne maîtrise des aspects numériques des évaluations.

2.2 Le scénario d'évolution normale et le modèle de sûreté associé

2.2.1 Les données générales

La représentation dans l'espace

Le stockage est constitué de plusieurs zones distinctes correspondant aux différents types de déchets. Dans le scénario d'évolution normale, ces différentes zones sont considérées comme superposées à un même emplacement, mais traitées de manière séparée de sorte que leurs effets se cumulent. Cela permet de s'affranchir d'hypothèses sur la répartition des zones les unes par rapport aux autres. Au stade actuel des recherches, en l'absence d'une localisation précise du stockage, cette démarche est prudente. Elle conduit en effet à concentrer sur un exutoire donné des flux supérieurs à ce qu'ils seraient dans la réalité.

Pour conduire le calcul, il convenait toutefois d'opérer un choix concernant la localisation du stockage. En effet, cette dernière influe sur les trajectoires qui pourraient être suivies par la radioactivité dans les formations encaissantes du Callovo-Oxfordien. De manière purement conventionnelle, il a été retenu de positionner le stockage sur l'emplacement du laboratoire souterrain, bien que cette localisation ne présente qu'une vraisemblance modeste. Dans le choix des exutoires, on a retenu les plus pénalisants par rapport à cette localisation donnée du stockage et parmi ceux qui résultent du modèle décrivant les circulations d'eau à l'échelle du secteur (modèle hydrogéologique).

Concernant le Callovo-Oxfordien, on a retenu une valeur minimale pour son épaisseur (130 m), correspondant à la valeur basse pour toute la zone de transposition, indépendamment de la localisation retenue. On a également considéré artificiellement que le stockage était positionné au plus profond de la zone car une telle position est pénalisante vis-à-vis des phénomènes mécaniques.

· La représentation dans le temps

La date de fermeture éventuelle du stockage est par définition inconnue compte tenu de la durée de la phase de réversibilité. Il en résulte une indétermination partielle sur l'état initial du stockage en début de post-fermeture. L'influence sur le stockage de la durée de la phase de réversibilité et des phénomènes physico-chimiques qui peuvent s'y dérouler a été évaluée de manière à s'assurer que la représentation retenue pour le scénario d'évolution normale restait valable pour les durées considérées, de l'ordre du siècle à quelques siècles. Il apparaît qu'une période pluriséculaire n'induit pas de variation significative.

Les phases de transition au cours desquelles la thermique, l'hydraulique et la mécanique du stockage évoluent sensiblement après la fermeture et avant le retour à un état d'équilibre naturel sont prises en considération.

Concernant la chaleur, le transitoire thermique est explicitement représenté à partir de calculs d'évolution du champ de température au sein du stockage. Ainsi, pour la phase thermique liée aux déchets C et aux combustibles usés, la dépendance des caractéristiques de l'argilite du Callovo-Oxfordien par rapport à la température est prise en compte pour les paramètres les plus sensibles au champ de température et les plus influents sur le transport en évolution normale, à savoir le coefficient de diffusion et les coefficients de partage lorsque cela est nécessaire. Cela n'est en fait utile que lorsque des radionucléides sont susceptibles de migrer durant la phase thermique, ce qui correspond uniquement à des cas de défaut d'étanchéité des conteneurs C et CU.

Concernant l'hydraulique, les phénomènes de désaturation et de resaturation sont trop complexes pour être représentés dans leur totalité. On s'est donc attaché par divers calculs préliminaires à préciser leur importance respective afin de définir une représentation simplifiée. Les évaluations préparatoires menées sur le transitoire hydraulique soulignent que les phénomènes d'écoulement convectif liés à la resaturation partielle du milieu ne sont pas de nature à créer des circulations réellement perturbatrices, et sont négligeables. De même, les conséquences sur le transport de l'évacuation des gaz de corrosion peuvent être négligées ; cette dernière n'engendre des gradients hydrauliques qu'en champ proche (quelques mètres autour des alvéoles) et sur des échelles de temps limitées (quelques milliers d'années), qui ne sont pas de nature à modifier les conditions de transport des radionucléides à l'échelle du Callovo-Oxfordien. Dans ces conditions, on retient, pour le scénario et le modèle de sûreté, un milieu totalement resaturé dès l'instant initial. Cela revient à considérer que l'eau est au contact des

déchets dès l'instant de la fermeture. Cette vision est évidemment peu réaliste, mais elle permet de disposer d'une approche simple de la situation. Elle correspond également à une vision majorante puisqu'elle néglige le fait que l'eau arrivera beaucoup plus tardivement sur les déchets alors que celle-ci est la cause des altérations chimiques et du relâchement des radionucléides.

Concernant la mécanique, les perturbations induites par le stockage sont prises en compte au travers des modifications de propriétés de la roche dans la zone endommagée autour des ouvrages. La zone endommagée est représentée dans son état après le creusement, en négligeant les phénomènes de fermeture et de cicatrisation à long terme. Comme les phénomènes thermomécaniques (pour les zones de déchets exothermiques) ou hydromécaniques (désaturation, migration des gaz de corrosion) ne sont pas susceptibles d'augmenter significativement l'endommagement initial, on se place ainsi dans une configuration pessimiste.

A long terme, l'environnement de surface va connaître des modifications. Ainsi, sous l'effet des évolutions climatiques (cycles glaciaires, réchauffement...), la morphologie du terrain va se transformer. Compte tenu de la profondeur du Callovo-Oxfordien, ce dernier ne sera pas affecté par ces phénomènes. En revanche, ces transformations modifieront les écoulements dans les formations sus-jacentes. Pour traiter ce point, on a retenu deux situations : un premier modèle est fondé sur le schéma actuel du milieu géologique avec les écoulements correspondants dans les différentes formations, un second modèle se fonde sur les résultats d'une prospective à un million d'années. Les calculs sont conduits en utilisant parallèlement ces deux modèles afin de disposer d'une vision qui encadre les évolutions possibles.

Evolution du stockage dans la modélisation de sûreté

L'évolution du stockage dans le temps est la suivante :

- dès la fermeture, on suppose qu'un régime hydraulique est atteint avec un stockage resaturé. L'eau est en contact avec les colis de déchets,
- la température des déchets est prise en compte pour déterminer la durée de la phase thermique (avec un pic inférieur à 100 ans pour les déchets C et à 1000 ans pour les combustibles usés). La dépendance des principaux paramètres sensibles par rapport à la température est prise en compte durant cette phase,
- on considère que la zone endommagée initiale autour des ouvrages ne se cicatrise pas,
- les modifications de l'environnement de surface au cours du temps sous l'effet des phénomènes naturels sont prises en compte au travers de deux situations contrastées : l'état actuel du site et l'état prospectif à un million d'années.

Les vecteurs de transport

Deux vecteurs peuvent favoriser le transport des radionucléides ou des toxiques chimiques contenus dans les déchets : l'eau et le gaz. Le modèle de sûreté ne retient que le transport par l'eau. En effet, les évaluations préliminaires montrent que les éléments radioactifs initialement sous forme gazeuse sont peu susceptibles de migrer à l'état de gaz et d'induire un impact. Pour une part, ils sont de période courte. Pour une autre part, ils passent rapidement en solution dans l'eau. En conséquence, le vecteur de transport retenu est l'eau qui, après contact avec les déchets, entraîne les radionucléides ou les toxiques qui peuvent se présenter sous forme soluble.

Le modèle de transport représente la diffusion et la convection dans le milieu géologique. Des calculs préparatoires permettent de simplifier la représentation du stockage (pas de représentation des ouvrages d'accès lorsqu'ils ne constituent pas une voie de transfert particulière).

Sélection des radionucléides pour les calculs de sûreté

Les radionucléides considérés pour les calculs de transport ont été sélectionnés afin de disposer d'une base représentative pour évaluer les impacts et traiter les principales questions liées au transfert des radionucléides vers l'homme et l'environnement. Pour le scénario d'évolution normale, il a d'abord été retenu de :

- traiter les chaînes d'actinides à l'aide d'un calcul simplifié préalable afin de montrer qu'il n'est pas nécessaire de les prendre en compte dans le calcul complet. En effet, compte tenu de leur forte rétention et précipitation dans le milieu géologique, ces derniers ne contribuent pas à l'impact à l'échelle de l'évaluation de sûreté (million d'années),
- prendre en considération les produits de fission et d'activation *a priori* les plus pénalisants au cours du temps.

La méthode définie consiste à ne retenir que les radionucléides de période supérieure à 1 000 ans et présentant *a priori* les comportements les plus pénalisants. Cette démarche a conduit à sélectionner 15 radionucléides : ¹²⁹I, ¹⁰⁷Pd, ¹³⁵Cs, ¹⁰Be, ⁹³Zr (³³Nb), ³⁶Cl, ⁹⁹Tc, ⁴¹Ca, ¹²⁶Sn, ⁵⁹Ni, ⁷⁹Se, ⁹⁴Nb, ¹⁴C, ⁹³Mo, ¹⁶⁶Ho. Des analyses complémentaires (calculs de transport) ont permis de vérifier que les radionucléides qui n'ont pas été sélectionnés ne contribuent effectivement pas à l'impact.

Pour les toxiques chimiques associés aux déchets et aux composants du stockage, on a traité quelques éléments chimiques paraissant les plus significatifs : le bore, le nickel, l'antimoine et le sélénium.

2.2.2 La représentation des déchets

Les colis de déchets B

Les déchets B sont placés dans des surconteneurs en béton. Ces derniers sont supposés n'être pas étanches à l'eau, mais imposent toutefois un environnement chimique homogène (en équilibre avec celui de l'alvéole en béton) limitant les flux de radionucléides grâce à des phénomènes de précipitation et de sorption. Cette représentation constitue une vision pessimiste puisque l'on peut supposer que les surconteneurs jouent également un rôle d'étanchéité, au moins dans les premières phases.

Concernant les déchets eux-mêmes, les modèles de relâchement de la radioactivité et les valeurs retenues pour l'évaluation dépendent des types de déchets. En l'absence de connaissance suffisante pour les colis B3 et B6, on considère un relâchement immédiat dès la présence d'eau. Pour les autres colis, on retient des modèles de relâchement dans le temps qui prennent en compte la corrosion des éléments métalliques constituant les déchets (colis B1, B4 et B5) ou l'altération de la matrice de bitumes (colis B2).

Modèles de relâchement des déchets B

Les déchets technologiques divers cimentés ou compactés (B3) et les déchets technologiques et de structure en vrac (B6) sont considérés comme immédiatement disponibles à l'arrivée d'eau (on les qualifie de labiles). Ce choix conduit nécessairement à retenir un modèle pénalisant puisque la totalité de la radioactivité est disponible dès l'arrivée de l'eau.

Pour les autres colis, les modèles de relâchement et les paramètres associés sont choisis parmi les modèles disponibles sur la base de :

- leur conformité aux expérimentations réalisées pour les valider,
- leur validité en condition de stockage,
- leur capacité à prendre en compte les phénomènes potentiellement perturbateurs qui peuvent être néfastes pour la tenue des déchets.

Pour les déchets activés (B1), les déchets de structure cimentés (B4) ou compactés (B5), on retient que la partie de l'inventaire contenue dans des éléments métalliques est relâchée à mesure de leur corrosion (en 100 000 ans pour les gaines en zircaloy des B4/B5, en 200 000 ans pour les éléments en inconel des B1, en 15 000 ans environ pour les éléments en inconel des B4/B5, en 20 000 ans environ pour les éléments en aciers inoxydables des B1et en 65 000 ans environ pour les éléments en aciers inoxydables des B4/B5).

Pour les boues bitumées (B2), la cinétique de relâchement est représentée par un modèle développé à partir d'une phénoménologie validée expérimentalement en laboratoire. Il est fondé sur la reprise d'eau par le bitume et sur un comportement des radionucléides assimilés aux sels solubles de la matrice du bitume. On néglige dans ce modèle des phénomènes favorables comme l'insolubilisation dont les radionucléides ont fait l'objet lors du traitement initial du déchet. Le taux de relâchement issu de ce modèle est inversement proportionnel à la racine carrée du temps et conduit, à 10 000 ans, à un relâchement de 90 % de la masse initiale contenue dans les colis de bitume.

Des études de sensibilité ont été réalisées avec des modèles pénalisants qui couvrent les incertitudes liées à l'évolution des colis :

relâchement labile pour les colis B1, B4 et B5 afin de se prémunir contre les incertitudes liées à la corrosion,
 pour les déchets B2, un modèle alternatif a supposé les radionucléides associés aux sels solubles (hypothèses pénalisantes) et relâchés dès la mise en solution de ceux-ci pour prendre en compte des problèmes de fluage, de fissuration, de teneurs en sels mal maîtrisées. Ce modèle dépend donc de la solubilité de ces derniers et des flux d'eau transitant dans les alvéoles. Il conduit à un relâchement progressif sur une période de 1 000 ans.

Les colis de déchets C vitrifiés

Les déchets vitrifiés sont placés dans un surconteneur en acier noir. Compte tenu de sa conception et en fonction des calculs préparatoires, on retient pour ce surconteneur une durée de vie conservative de 4000 ans pendant lesquels aucun relâchement ne peut s'opérer.

Le surconteneur se caractérise par une grande robustesse dans sa conception et ferait l'objet de contrôles vis-à-vis de possibles défauts de fabrication. On a néanmoins retenu de manière prudente la possibilité d'un tel défaut dans le calcul. Au stade actuel des études, sa définition revêt un caractère arbitraire ; on retient dans le scénario d'évolution normal la défaillance d'environ 1/10 000 de la totalité des conteneurs, ce qui est conforme au retour d'expérience dans le domaine (un colis C0, un colis C1 ou C2 et un colis C3 ou C4). Dans le calcul, ce défaut s'exprime de manière conventionnelle un siècle environ après la production du colis primaire et se traduit de manière pénalisante par une perte d'étanchéité totale.

Le relâchement des radionucléides par le verre s'initie dès la perte d'étanchéité du surconteneur. Les modèles de relâchement associé à la dissolution du verre et les paramètres associés diffèrent selon la nature du colis de déchets vitrifiés :

- les verres C0 et les verres se trouvant dans un surconteneur défaillant suivent un modèle fondé sur la vitesse de dissolution initiale du verre et la surface d'échange offerte par ce dernier (modèle dit V₀.S) ;
- les autres verres, soit la majorité de l'inventaire, répondent à un modèle phénoménologique dit « V₀.S→Vr » comprenant deux phases. Le modèle est d'abord fondé sur la vitesse de dissolution initiale jusqu'à saturation en silice du milieu environnant (analogue du modèle V₀.S précédent). Puis, dans une seconde phase, la cinétique de dissolution décroît jusqu'à une vitesse résiduelle (Vr). Le transitoire entre ces deux phases n'est pas représenté (voir chapitre 2).

Pour les verres C0, une sensibilité a été réalisée avec des paramètres conservatifs pour le modèle V_0 .S. Pour les verres C1 à C4, une étude de sensibilité a été réalisée avec le modèle de relâchement V_0 .S.

Les colis de combustibles usés

Dans le cas où les combustibles usés ne sont pas retraités, les assemblages sont placés dans un conteneur en acier noir de forte épaisseur. Compte tenu de sa conception et en fonction des calculs préparatoires, on retient pour ce surconteneur une durée de vie conservative de 10000 ans, pendant lesquels aucun relâchement ne peut s'opérer.

Selon une logique similaire à celle suivie pour les déchets C, on considère pour le calcul de référence qu'une fraction d'environ 1/10 000 des conteneurs est défaillante et présente une perte d'étanchéité totale (un conteneur CU1 et un conteneur CU2).

Le relâchement des radionucléides par les assemblages de combustibles usés s'initie après la perte d'étanchéité du conteneur. Le modèle de relâchement est fonction de la localisation des radionucléides dans les sous-ensembles physico-chimiques des assemblages. On distingue :

- un modèle de relâchement progressif des radionucléides contenus dans les composants métalliques.
 Le relâchement est supposé congruent à la vitesse de corrosion des composants. Cela conduit à des relâchements sur des durées allant de 500 ans environ pour les radionucléides contenus dans les éléments de structures en inconel à 20 000 ans pour les radionucléides contenus dans les gaines,
- un modèle de dissolution de la matrice de combustibles sous l'effet de la radiolyse (dit modèle radiolytique) conduisant à un relâchement progressif des radionucléides localisés au sein de la matrice sur environ 50 000 ans. Ce modèle de dissolution, retenu dans le calcul de référence, est un modèle conservatif, plus pénalisant que celui généralement retenu au plan international,
- une fraction supposée labile.

En analyse de sensibilité, on a testé un modèle encore plus pénalisant qui consiste à accélérer la vitesse de dissolution radiolytique, et un modèle plus proche des modèles retenus à l'international, qui prend en compte une dissolution à l'échelle de plusieurs millions d'années.

2.2.3 La représentation de la migration des radionucléides dans les alvéoles de stockage

Alvéoles de déchets B

Après leur relâchement par les colis de déchets, les radionucléides peuvent migrer au sein de l'alvéole pour atteindre le Callovo-Oxfordien ou le scellement d'alvéole argileux situé en tête de galerie de stockage.

A l'instar du béton du colis de stockage, le béton du revêtement de l'alvéole ne se voit pas allouer de performance hydraulique et de transport. Il est représenté comme un environnement homogène qui assure simplement un confinement chimique en limitant les flux de toxiques par les phénomènes de précipitation et de sorption.

Le scellement de l'alvéole (et son ancrage dans la roche) est destiné à empêcher ou freiner les flux d'eau qui pourraient le traverser. Il présente donc des propriétés hydrauliques. La valeur retenue est de 10⁻¹¹ m/s pour la perméabilité de l'argile gonflante, ce qui conduit à un scellement moins performant que ce qui a pu être observé dans le cadre de l'essai TSX mené en laboratoire souterrain au Canada (essai d'un scellement à base d'argile à échelle réelle). Ce choix constitue donc une option prudente dans la mesure où il minore les performances envisageables. La nature de l'argile du bouchon (argile gonflante) conduit également à lui attribuer des performances de rétention chimique des éléments dissous.



Représentation de l'alvéole B et modélisation des phénomènes de transfert des radionucléides

Alvéoles de déchets C

Après leur relâchement par les colis de déchets, les radionucléides peuvent migrer directement vers le Callovo-Oxfordien, vers le bouchon argileux ou la galerie de stockage contiguë au bouchon de l'alvéole.

Les bouchons d'alvéoles sont représentés avec des propriétés identiques à celui des alvéoles B (hors ancrage qui n'existe pas pour les alvéoles C du fait de leur petit diamètre et de l'absence de zone fracturée au droit du bouchon). Du fait de leur grand nombre, il est retenu qu'un 1/1000 des bouchons d'alvéoles de déchets C est défaillant dès la fermeture du stockage, du fait d'une interface entre le bouchon et la roche peu performante d'un point de vue hydraulique. Il s'avère en fait que ce choix n'a pas d'influence sur les transferts, dans le modèle considéré.

Alvéoles de combustibles usés

Après leur relâchement par les colis de déchets, les radionucléides peuvent migrer directement vers le Callovo-Oxfordien après migration dans la barrière ouvragée argileuse, vers le bouchon argileux ou la galerie de stockage contiguë au bouchon de l'alvéole.

Le transport dans les alvéoles de combustibles usés est représenté sur un mode comparable au transport dans les alvéoles de déchets C.

La particularité est la présence de la barrière ouvragée en argile gonflante autour des alvéoles. On attribue à cette barrière ouvragée des performances hydrauliques et de rétention similaires à celles du bouchon. Il n'est pas retenu de défaillance de bouchons d'alvéole compte tenu de la continuité qui existe entre ce dernier et la barrière ouvragée en argile gonflante.

2.2.4 La migration dans les galeries ou les puits

A la sortie des alvéoles, une fraction des éléments relâchés peut atteindre les galeries remblayées du stockage : elle transite au travers de ces dernières avant de migrer dans l'argilite du Callovo-Oxfordien ou de se diriger vers les puits scellés.

Les galeries sont constituées d'une part du soutènement et du radier en béton qui reste en place, d'autre part du remblai. On retient une approche prudente pour les valeurs des propriétés hydrauliques dans les galeries, considérant une perméabilité très élevée pour les soutènements (égale à 10⁻⁶m/s). Celle du remblai (à base d'argilites excavées remaniées) est considérée inférieure (égale à 10⁻⁸m/s), mais ce paramètre a peu d'influence à cause de la proximité du soutènement qui possède des propriétés hydrauliques plus médiocres.



La représentation des scellements de galeries est similaire à celle des scellements d'alvéoles de déchets B. Les puits sont également pourvus de scellements qui ne sont toutefois pas ancrés du fait de l'absence de zone fracturée dans les niveaux du Callovo-Oxfordien où ils sont implantés. Les performances de leur noyau en argile gonflante sont similaires à celles imparties aux noyaux des scellements de galeries.

2.2.5 La migration dans les argilites du Callovo-Oxfordien

Dans la zone endommagée par la création du stockage

La zone endommagée autour des alvéoles est représentée avec l'extension maximale possible sur la zone de transposition (influence de la profondeur). On rappelle par ailleurs que les études ont montré que les perturbations chimiques induites par la présence de matériaux exogènes (perturbations alcalines, interaction fer-argile...) sont d'une extension similaire à celle de la zone présentant des petites fractures mécaniques, et négligeables devant l'extension de la zone microfissurée. Pour les ouvrages de stockage orientés selon la contrainte principale majeure (alvéoles, galeries où sont réalisés des scellements), on considère donc que :

- la zone fracturée est d'une ampleur égale à 0,1 fois le rayon de l'ouvrage considéré et présente des performances hydrauliques médiocres (5.10⁻⁹ m/s) ainsi que des propriétés de diffusion dégradées. Les solubilités et sorptions des différents radionucléides correspondent aux valeurs retenues pour les argilites saines dans la mesure où elles résultent du contexte géochimique imposé par les argilites,
- la zone microfissurée peut s'étendre jusqu'à 0,7 fois le rayon et présente une perméabilité dégradée de 5.10⁻¹¹ m/s ainsi que des propriétés de diffusion et des capacités de rétention chimique identiques à celles de la roche-hôte.

En analyse de sensibilité, pour la zone fracturée, on teste un schéma très pénalisant, considérant la perméabilité d'un sable (10⁻⁶ m/s) et une absence complète de capacité de rétention chimique. Pour la zone microfissurée, on a retenu en sensibilité une perméabilité de 5.10⁻⁹ m/s et des propriétés de diffusion et des capacités de rétention dégradées.

Dans les argilites saines

Compte tenu des données acquises sur la formation-hôte, celle-ci est représentée comme un milieu homogène où les radionucléides peuvent migrer essentiellement par diffusion. Bien que la convection soit prise en compte, elle demeure très négligeable.

Les valeurs de perméabilité déterminées *in situ* ou sur échantillons sains conduisent à des valeurs comprises entre 10⁻¹⁴ m/s et 10⁻¹³ m/s. La structure du milieu suggère une anisotropie de perméabilité et conduit, à titre prudent, à retenir une valeur dix fois plus forte pour la composante horizontale.

Le calcul de référence prend donc en compte une valeur de 5.10⁻¹⁴ m/s pour la perméabilité verticale et de 5.10⁻¹³ m/s pour la perméabilité horizontale. L'influence de la température sur la valeur de perméabilité n'est pas retenue pour les calculs du scénario d'évolution normale, mais elle est prise en compte dans les scénarios altérés pour lesquels elle est un paramètre plus influent.



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



En fonction des observations conduites sur échantillons, on attribue à l'argilite les propriétés de rétention constatées pour les différents éléments pris en compte dans les calculs. Afin de couvrir largement les incertitudes, des valeurs conservatives ont été retenues.

Des analyses de sensibilité ont été conduites sur les paramètres de transport et géochimiques dans la barrière géologique, notamment pour les valeurs de coefficients de diffusion et de porosité, les valeurs de coefficient de retard et de limite de solubilité.

La différence de pression entre les deux formations qui encadrent les argilites du Callovo-Oxfordien se traduit par un gradient hydraulique. De manière cohérente avec les modèles hydrogéologiques retenus, on a considéré pour ce gradient la valeur la plus élevée constatée sur la plus grande partie de la zone de transposition, soit 0,2 m/m pour le modèle hydrogéologique actuel et 0,4 m/m pour le modèle à un million d'années.

2.2.6 La migration dans les formations encaissantes

Au-delà de la formation du Callovo-Oxfordien, les éléments transportés entrent dans les formations encaissantes où ils peuvent migrer par diffusion ou par convection/dispersion. Le mode de transfert dominant dépend des caractéristiques propres à chaque formation. Les propriétés de ces formations sont représentées de manière conservative, en supposant la continuité des horizons poreux où peut circuler l'eau.



Représentation des encaissants et phénomènes de transfert des radionucléides

La représentation simplifiée des formations encaissantes a consisté à regrouper des couches présentant des performances hydrauliques et de transport proches. Elles sont modélisées avec des épaisseurs constantes égales à celles rencontrées au niveau du site de Meuse/Haute-Marne ; aucune performance géochimique pouvant induire un retard au transport ne leur est attribuée. On n'a considéré aucune évolution sédimentologique pouvant conduire à réduire les propriétés hydrauliques des niveaux producteurs dans l'Oxfordien.

Dans le modèle représentant la situation actuelle, on distingue depuis le Callovo-Oxfordien vers la surface :

- l'Oxfordien carbonaté qui est représenté en distinguant les divers niveaux poreux ou non qui le composent. On prend en compte, de la base au sommet, un premier ensemble peu perméable (10⁻¹¹ m/s) d'environ 60 m (correspondant aux faciès C3a-C3b), un niveau poreux d'environ 50 m d'épaisseur de perméabilité plus importante (3.10⁻⁸ m/s), un ensemble de 150 m représentant les calcaires compacts des inter-poreux (10⁻⁹ m/s), un second niveau poreux de 5 m d'épaisseur de perméabilité élevée (3.10⁻⁸ m/s), puis un ensemble de 25 m d'épaisseur représentant des calcaires compacts (10⁻⁹ m/s) au sommet de l'Oxfordien,

- le Kimméridgien est représenté par une couche unique de faible perméabilité (10⁻¹¹ m/s) d'environ 110 m d'épaisseur lorsqu'il est sous couverture, c'est-à-dire surmonté par une autre formation (ce qui est le cas pour presque toute la zone modélisée);
- les calcaires du Barrois représentés en deux couches avec un ensemble inférieur où aucune manifestation karstique n'est observée et un ensemble supérieur représentant les niveaux potentiellement karstiques de la formation. L'épaisseur des calcaires du Barrois varie sur la zone modélisée en fonction de la topographie de surface.

Dans le modèle à un million d'années, la représentation précédente est modifiée pour tenir compte de l'érosion de surface :

- le Kimméridgien et le sommet de l'Oxfordien, lorsque ces formations sont affleurantes, ont des perméabilités de 10⁻⁷ m/s ; lorsqu'elles sont sous couverture, leurs propriétés hydrauliques sont similaires au modèle géologique actuel,
- les calcaires du Barrois, hors quelques endroits très limités, ont disparu sur l'ensemble de la zone modélisée.

Au-dessous du Callovo-Oxfordien, le Dogger est représenté dans les deux modèles (actuel et à un million d'années) comme une couche de faible perméabilité (10⁻¹⁰ m/s) d'épaisseur constante (150 m). Dans cette couche, un niveau poreux plus perméable (10⁻⁸ m/s) et de faible épaisseur (environ 5 m) est représenté 20 m environ sous le Callovo-Oxfordien pour prendre en compte les faibles venues d'eau observées au niveau du Bathonien (venues d'eau qui semblent en fait relativement localisées).

2.2.7 Le choix des exutoires

La modélisation des circulations d'eau à l'échelle du secteur conduit à identifier les différents exutoires envisageables, c'est-à-dire les endroits où l'on serait susceptible de recueillir une eau contenant des radionucléides issus du stockage. L'analyse de sûreté doit ensuite procéder à des choix pour retenir ceux qui seront les plus pénalisants au regard des doses engagées.

Le choix de la localisation des exutoires au sein de chaque modèle hydrogéologique est fait selon les principes suivants :

- on néglige les exutoires naturels, c'est-à-dire les voies naturelles de débouché des eaux, car bien qu'étant de loin les plus probables, ils ne conduisent pas aux doses les plus élevées du fait de la dilution,
- on considère des pompages d'exploitation d'eau dans les horizons poreux des formations encaissantes, à partir desquels un individu du groupe critique collecte de l'eau contaminée en radionucléides pour ses besoins en eau de boisson ou une utilisation de type agricole. Moins probables, ces derniers sont plus pénalisants puisque la dilution de la contamination y est moindre. Ces exutoires sont volontairement situés au plus près du site conventionnel du stockage sur des zones où le débit d'eau est faible et, dans la plupart des cas, à des profondeurs de 50 à 100 m. Ce choix pessimiste revient à majorer fortement l'impact calculé.

Cette démarche est plus pénalisante que les recommandations de la RFS III.2.f qui précise que « *les exutoires* seront constitués par les cours d'eau et des pompages peu profonds d'alimentation en eau ».

Parmi les exutoires considérés, celui par forage dans la vallée de la Saulx apparaît le plus pénalisant. Il consiste à pomper au premier endroit où l'on peut obtenir de l'eau à proximité immédiate du stockage et en retenant une zone où les concentrations de radionucléides sont maximales. Cet exutoire est ainsi placé en amont de tous les exutoires naturels que pourraient rencontrer les radionucléides au cours de leur migration dans les encaissants. Il est situé à proximité du site mais hors de la zone de transposition, sur une zone où la modélisation hydrogéologique retient l'existence d'une fracturation diffuse, à ce jour purement hypothétique, selon une direction parallèle aux failles de la Marne.

Zone de fracturation diffuse

Dans la modélisation, une zone de fracturation diffuse dans l'Oxfordien (située hors de la zone de transposition) a été représentée en s'appuyant sur les mesures réalisées dans le forage EST321 (à l'ouest de la Saulx), où une venue d'eau plus importante que dans les autres forages dans l'Oxfordien a été observée. Il s'agit d'un choix de modélisation hydrogéologique prudent.



Les exutoires pour l'évaluation de sûreté

Sur la base des principes retenues pour la définition des exutoires, plusieurs zones d'exutoires ont été retenues pour le modèle hydrogéologique actuel.

Dans les encaissants supérieurs :

- un exutoire par pompage positionné à la limite de la zone de fracturation diffuse au plus près du stockage (débutant approximativement à la vallée de la Saulx), à l'ouest des failles de la Marne. Il s'agit d'un pompage positionné au niveau de la Saulx à l'endroit où la concentration de radionucléides est maximale,
- un exutoire par pompage dans les calcaires du Barrois ou le Kimméridgien marneux à l'affleurement.

Pour le Dogger (encaissant inférieur), aucun exutoire ne peut être déterminé dans la zone d'étude. On a néanmoins retenu un exutoire conventionnel par pompage au voisinage de la vallée de la Saulx.

Dans le modèle hydrogéologique à un million d'années, l'érosion de surface conduit à une évolution des zones d'exutoire dans les encaissants supérieurs :

- un exutoire apparaît dans la vallée de l'Ornain. Il est assimilé à une source ou un pompage dans l'intervalle poreux supérieur, montrant à cet endroit des propriétés légèrement plus favorables à une exploitation (amélioration de la perméabilité liée à la mise à l'affleurement),
- l'exutoire par pompage positionné à la limite de la zone de fracturation diffuse au plus près du stockage (débutant approximativement à la vallée de la Saulx) demeure,
- l'exutoire par pompage dans les calcaires du Barrois ou le Kimméridgien marneux à l'affleurement est modifié selon l'évolution de la topographie.

Pour le Dogger (encaissant inférieur), le même exutoire conventionnel est retenu.

Le choix de retenir des exutoires proches du site permet de limiter fortement l'influence du modèle hydrogéologique sur le calcul d'impact et de s'affranchir de l'influence des failles de la Marne et de leur étude détaillée. En tout état de cause, un exutoire situé à ce niveau serait moins pénalisant compte tenu des effets de la dilution.



Trajectoires des écoulements et exutoires retenus pour l'évaluation de sûreté Modèle hydrogéologique à l'actuel



Trajectoires des écoulements et exutoires retenus pour l'évaluation de sûreté Modèle hydrogéologique à un million d'années

6

2.2.8 La biosphère

L'eau extraite des exutoires est supposée utilisée comme eau d'arrosage dans un jardin potager ou comme eau de boisson. Le modèle prend en compte le transfert des radionucléides dans la biosphère (dans les plantes et les animaux) jusqu'à un membre du groupe critique. Celui-ci est constitué de villageois agriculteurs vivant pour l'essentiel de leurs cultures. Un groupe vivant totalement en autarcie a aussi été étudié.

La biosphère représente le dernier compartiment du transfert des radionucléides vers l'homme et son environnement. Dans le cadre du programme international BIOMASS de l'AIEA, trois biosphères de référence ont été identifiées comme pouvant occuper la région de Meuse/Haute-Marne au cours du prochain million d'années : biosphère tempérée (semblable à l'actuelle), biosphère boréale et toundra. Chacune de ces biosphères est associée à des pratiques agricoles adaptées aux conditions climatiques. Pour chacun des climats envisagés, il est montré que le groupe « villageois agriculteurs » est celui qui est associé au plus grand nombre de voies d'atteinte. On a considéré la biosphère tempérée qui apparaît la plus pénalisante.



Représentation schématique de la biosphère tempérée

Biosphères

Les trois biosphères définies dans le cadre du programme BIOMASS sont :

- *la biosphère tempérée* est celle existant sur la France actuellement. Cet habitat est caractérisé par des étés chauds, des hivers froids et une température annuelle moyenne comprise entre 8 et 10 °C ;
- la toundra désigne l'habitat s'étendant de la limite septentrionale des calottes glaciaires arctiques à la limite nord de la forêt boréale et couvrant l'Amérique du Nord, l'Europe du Nord et la Sibérie. C'est un espace dénué d'arbres au climat très sec et froid. La température moyenne annuelle est négative ;
- la biosphère boréale est associée à un climat caractérisé par des hivers longs, froids et secs. La température moyenne annuelle est de quelques degrés au-dessus de 0. La forêt boréale s'installe sur des régions qui étaient couvertes de glace lors des glaciations précédentes. Elle constitue environ 30 % des forêts du globe et s'étend entre les latitudes 50 °N et 60 °N.

2.3 Les résultats de l'évaluation de performance en évolution normale

Le scénario d'évolution normale et le modèle de sûreté associé constituent les outils de base pour conduire les calculs de sûreté. Ces derniers forment le socle de l'évaluation de performance en apportant des indications quantitatives sur le comportement du stockage vis-à-vis du relâchement des radionucléides à différentes échelles de temps. La présentation retenue privilégie quatre angles d'approche :

- l'évaluation de la robustesse des grandes fonctions de sûreté imparties au stockage,
- la présentation des doses les plus pénalisantes en fonction des différents exutoires et selon les types de colis de déchets,
- les enseignements des analyses de sensibilité pour apprécier le poids de certaines variantes sur les résultats,
- une appréciation d'ensemble de la robustesse du concept de stockage.

2.3.1 Les grands enseignements vis-à-vis des fonctions de sûreté

On présente les conclusions de l'analyse au regard des trois fonctions de sûreté principales du stockage telles que prévues dans la conception du stockage.

• S'opposer à la circulation d'eau

L'architecture de stockage a été conçue de manière à s'opposer aux mouvements d'eau (fractionnement, topologie en « cul-de-sac », scellements multiples), en mobilisant les propriétés favorables (faible perméabilité) de la formation géologique. L'évaluation doit permettre d'apprécier si le transport dans le stockage s'effectue bien de manière dominante selon un mode diffusif et si les circulations convectives sont minoritaires. Cela implique, en particulier, de vérifier que les radionucléides se dirigent bien vers le milieu géologique et ne suivent pas des voies de transfert préférentiel le long des ouvrages de stockage ou des galeries.

Un indicateur simple (nombre de Péclet) permet d'évaluer l'importance respective des deux modes de transport. Pour des nombres de Péclet inférieur à 1, le mode de transport dominant est diffusif. Les calculs indiquent des nombres de Péclet dans le Callovo-Oxfordien de l'ordre de 0,13 pour les anions (espèces chargées négativement et plus mobiles) et de 0,01 pour les cations (espèces chargées positivement et plus retenues). Le transport diffusif prédomine donc sur le transport convectif : les circulations d'eau dans le stockage sont extrêmement faibles. Ce résultat est très robuste, dans la mesure où les analyses de sensibilité conduites avec des performances du Callovo-Oxfordien dégradées d'un facteur 10 en matière de perméabilité conduisent à des résultats similaires.



Schéma illustrant l'architecture en "cul-de-sac" et les scellements multiples

Un indicateur de la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » : le nombre de Péclet

Le nombre de Péclet est égal au rapport entre le temps caractéristique de migration diffusive et le temps de transfert convectif. Si le phénomène de diffusion l'emporte sur le phénomène de convection, le temps caractéristique de migration diffusive est inférieur au temps de transfert convectif ; le nombre de Péclet est alors inférieur à 1. La convection l'emporte sur la diffusion quand le nombre de Péclet est supérieur à 2. Pour des valeurs comprises entre 1 et 2, la diffusion et la convection sont co-dominantes.

Une autre manière d'apprécier la capacité du stockage à freiner les flux d'eau en son sein consiste à apprécier les voies de transfert privilégiées des radionucléides. Si le mode de transfert diffusif domine, les éléments mobiles doivent à plus ou moins brève échéance migrer préférentiellement vers le milieu géologique et non au travers des galeries vers les puits.

L'indicateur retenu pour apprécier le milieu de migration privilégié est la répartition des masses respectives d'éléments transitant par les ouvrages depuis les alvéoles de stockage jusqu'au puits d'accès, ou migrant finalement par diffusion dans le Callovo-Oxfordien. L'évaluation quantitative la plus significative a été menée pour un radionucléide à vie longue, soluble et non retenu par le milieu, l'iode129. Ce dernier présente l'intérêt d'être l'un des plus mobiles de tous les éléments et d'être le contributeur principal à l'impact constaté. Le retenir comme indicateur donne donc une mesure simple des performances du concept de stockage et du milieu géologique.

Le calcul met en évidence les éléments suivants (à l'échelle d'un million d'années et par rapport à l'inventaire initial contenu dans les colis) :

- dès le relâchement par le colis au sein de l'alvéole, plus de 40 % de la masse migre vers l'argile sur un mode diffusif,
- après passage dans les ouvrages de stockage, plus de 99,99 % de la masse se dirige dans le milieu géologique sain,
- au final, le drain que pourrait constituer le puits n'entraîne qu'une part infime de l'iode129 qui est majoritairement présente dans le milieu géologique.

Ces résultats montrent que la majorité de la masse emprunte la voie de transfert du Callovo-Oxfordien qui est ainsi le milieu de transfert privilégié.



Répartition de la masse à travers les différents compartiments de calculs (1281 des CU1)



6

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le comportement et la sûreté à long terme du stockage et de son environnement

Cela garantit que le transport des éléments s'effectue sur un mode diffusif, bénéficiant par conséquent de vitesses lentes et des capacités de rétention liées à la géochimie des argilites. Le risque d'un transfert préférentiel par la zone endommagée, même avec la description pessimiste qui en est donnée dans le scénario d'évolution normale, est écarté. Cela souligne l'efficacité de la conception proposée, qui tire parti des propriétés favorables de la formation-hôte.

La fonction « s'opposer à la circulation d'eau » est assurée de manière efficace par le stockage et constitue une première garantie au regard de la sûreté.

• Limiter le relâchement des radionucléides, les immobiliser dans le stockage, retarder et atténuer leur migration

La deuxième fonction consiste à limiter le relâchement des radionucléides et à les immobiliser dans le stockage. Elle est assurée par les colis de déchets (conteneurs et matrices) et par la formation géologique (notamment conditions géochimiques conduisant à la précipitation des radionucléides). La troisième fonction importante du stockage, assurée principalement par la formation géologique, consiste à retarder le transfert des éléments et à atténuer leur migration. Elle résulte à la fois des propriétés géochimiques du milieu qui conduisent à fixer certains éléments et des vitesses de diffusion très lentes au sein du milieu. L'objectif est





Schémas illustrant les fonctions de limitation des relâchements et d'atténuation de la migration des radionucléides

de piéger l'essentiel de l'inventaire radioactif dans l'argile et de retarder l'apparition de la part résiduelle de radionucléides jusqu'à ce qu'une décroissance sensible de leur radioactivité se soit produite. L'un des indicateurs principaux utilisés pour apprécier ces fonctions est le coefficient d'atténuation apporté par le milieu géologique, c'est-à-dire la fraction de l'inventaire en un radionucléide donné qui ne dépasse pas une certaine distance.

Des indicateurs des fonctions « limiter le relâchement et immobiliser », « retarder et atténuer »

Les performances associées aux fonctions « immobiliser les radionucléides », « retarder et atténuer leur migration » dans le stockage sont quantifiables à l'aide de trois grandeurs associées au débit molaire de chaque radionucléide en sortie d'un élément du stockage :

- le débit molaire maximal,
- la masse correspondant à l'intégrale du débit molaire sur la durée de la simulation (un million d'années),
- le temps d'apparition du débit molaire maximal.

Au terme de la période étudiée d'un million d'années, les principaux résultats sont les suivants :

- à une dizaine de mètres dans le Callovo-Oxfordien, environ la moitié des radionucléides étudiés sont totalement atténués (>99%). Ils sont donc présents en quantité négligeable au-delà de cette limite,
- au sommet du Callovo-Oxfordien, c'est-à-dire à la sortie de la formation-hôte, les flux de la plus grande part des radionucléides sont totalement atténués. Il en va de même à la base de la couche d'argilites,
- seuls quatre éléments (iode129, chlore 36 et sélénium 79 et calcium 41) présentent encore un flux au toit du Callovo-Oxfordien. Le calcium 41 et le sélénium 79 sont cependant déjà très fortement atténués,
- parmi les quatre éléments précédents, seuls l'iode et le chlore ont des coefficients d'atténuation plus modestes : 65 à 75 % pour le chlore, 20 à 50 % pour l'iode.

Radionucléides	Atténuation de la masse à la (toit +	Atténuation de la masse à la sortie du Callavo-Oxfordien (toit + mur)		
	Déchet C / CU	Déchets B		
⁹³ Mo, ¹⁰ Be, ^{93m} Nb, ⁹⁴ Nb, ⁹⁹ Tc, ¹²⁶ Sn, ^{166m} Ho	Atténuation te	otale (100 %)		
¹⁴ C, ¹³⁵ Cs, ¹⁰⁷ Pd, ⁵⁹ Ni, ⁹³ Zr				
⁷⁹ Se	> 99.9	95 %		
⁴¹ Ca	90 – 95 %	> 99 %		
³⁶ Cl	65 – 75 %	> 70 %		
129	20 – 30 %	> 50 %		

Atténuation dans la formation du Callovo-Oxfordien

Atténuation totale (100%) dans les 10 premiers mètres environ de Callovo-Oxfordien Atténuation très forte (>90%) dans les 10 premiers mètres environ de Callovo-Oxfordien

Un autre indicateur pour la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides » est la date d'apparition d'un flux de radionucléides en un point donné du milieu géologique.

Pour le chlore 36 et l'iode 129, les propriétés de diffusion dans le Callovo-Oxfordien sont telles qu'elles retardent l'apparition du maximum de flux de radionucléides à la sortie de la formation jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années. Dans le cas du chlore 36, compte tenu de sa période, la décroissance radioactive commence à produire ses effets de manière sensible avant l'apparition d'un flux significatif au sortir de la formation argileuse. Il en résulte que l'iode 129 est dans la plupart des cas l'élément apportant la contribution majeure aux doses à l'exutoire. *La formation argileuse joue un rôle de milieu retardant la sortie des éléments mobiles jusqu'à des dates lointaines de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'années.*

Après la sortie de la formation argileuse, les éléments non atténués pénètrent dans les encaissants (Oxfordien au-dessus, Dogger en dessous). Le modèle hydrogéologique permet d'évaluer les temps de transfert vers les différents exutoires. Ces temps de transferts sont courts au regard de ceux au sein de la formation géologique (de l'ordre de 50 000 ans pour le modèle à un million d'années, 100 000 ans pour le modèle actuel, pour l'exutoire le plus proche de la Saulx qui est le plus pénalisant).



Cela signifie que, dans la représentation considérée pour le modèle de sûreté, les formations encaissantes jouent un rôle très modeste, voire négligeable. Ce constat est logique dans la mesure où :

- aucune propriété de rétention liée à la géochimie n'a été allouée à ces formations, à titre prudent, alors qu'il est vraisemblable qu'elles possèdent, pour tout ou partie, de telles propriétés ;
- les exutoires retenus ont été pris au plus proche du stockage et dans des configurations volontairement pénalisantes.

Ces deux éléments soulignent que des marges de sûreté significatives existent si l'on prenait en compte les caractéristiques géochimiques ainsi que les exutoires réels, qui seront nécessairement moins conventionnels et pénalisants que ceux retenus.

Les fonctions « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser » et « retarder et atténuer la migration » sont assurées de manière efficace par le stockage. Seul un très petit nombre de radionucléides est susceptible de migrer hors de la formation-hôte et cette sortie se situe à des horizons lointains (100 000 ans et au-delà). Ces fonctions reposent principalement sur le milieu géologique argileux. Pour la fonction « retarder et atténuer », les formations encaissantes ne se sont vues allouer aucune performance.

L'examen des principales fonctions de sûreté permet, indépendamment des évaluations de doses, de conclure à une bonne performance du stockage, conforme aux attentes du concepteur. Cela conforte les choix opérés tant dans l'architecture du stockage que dans l'appréciation du caractère a priori favorable de la formation géologique.

2.3.2 Les évaluations de doses aux différents exutoires

L'indicateur principal pour évaluer l'impact du stockage est la dose à un exutoire. Cette dernière est évaluée à partir des choix pénalisants d'exutoires précisés ci-dessus. Les contributeurs essentiels à la dose sont l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79.

Afin de disposer de données aisément accessibles, on présente les résultats pour l'exutoire donnant les plus fortes doses, à savoir l'exutoire Saulx pour l'Oxfordien. Tous les autres exutoires présentent des doses inférieures de plusieurs ordres de grandeur à celle constatée dans ce cas. Cet exutoire constitue un choix conventionnel, peu réaliste et très probablement excessivement pénalisant. On s'est en effet placé au maximum de concentration pour prélever de l'eau à un endroit où cette dernière est présente en faible quantité alors qu'à moins d'un kilomètre se trouvent des ressources plus abondantes. La probabilité de voir cet exutoire se concrétiser est donc très faible.

On fournit les résultats pour les deux modèles hydrauliques (à l'actuel et à un million d'années) et en traitant séparément les déchets B, les déchets C et les combustibles usés.

Afin de disposer d'estimations cohérentes et prudentes, on a retenu les conventions suivantes. Pour les déchets B, on a pris en compte un scénario avec traitement (S1b). Pour les verres, on a distingué les différentes catégories de verres en retenant la quantité maximale selon les scénarios de traitement (S1a pour les verres C3 et C4, S1b pour les verres C1 et C2, la quantité de verres C0 est identique dans tous les scénarios). Enfin, les doses associées au stockage de combustibles usés EDF du parc électronucléaire (CU1 et CU2) sont évaluées à partir du scénario S2 (arrêt du traitement) qui conduit aux valeurs les plus importantes. Les résultats pour les combustibles usés CEA de recherche et de la Défense (CU3) sont également donnés. Ce mode d'approche permet de disposer d'une vision individualisée de l'impact de chaque type de déchets. Il faut en revanche souligner que l'addition des différents impacts ne rend pas compte d'une situation réelle puisqu'elle revient plus ou moins à compter deux fois le même inventaire (on ne peut à la fois avoir les verres C1/C2 et C3/C4 en quantité maximale). Quoi qu'il en soit, on verra que, même avec ce biais, les estimations globales demeurent très inférieures aux valeurs de référence.

	Modèle hydrogé	ologique à l'actuel	Modèle hydrogé	éologique à 1 Ma
	Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)	Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)
Tous déchets B scénario S1b	0,00047	370 000	0,00047	300 000
Tous déchets C (C0, C1+C2 scénario S1b, C3+C4 scénario S1a)	0,0008	550 000	0,00083	490 000
Combustibles CU1+CU2 scénario S2	0,022	410 000	0,020	330 000
Combustibles CU3	0,000073	400 000	0,000067	330 000

Synthèse des doses maximales à l'exutoire le plus pénalisant (Saulx)



Evolution de la dose à l'exutoire (Saulx) au cours du temps. Colis type B2 (boues bitumées) - modèle 1 Ma



Evolution de la dose à l'exutoire (Saulx) au cours du temps. Colis type C1 + C2 - modèle 1 Ma

Plusieurs conclusions peuvent être tirées :

- dans tous les cas, la dose se situe significativement en dessous de la valeur de référence de 0,25 mSv par an (au moins un facteur 10),
- les deux modèles hydrogéologiques conduisent à des résultats similaires en termes de niveau de doses.
 Le modèle à un million d'années conduit à des dates de maxima de dose légèrement plus précoces, les différences n'étant toutefois que peu significatives. Cela montre que l'évaluation est peu sensible à l'évolution du modèle hydrogéologique,
- la contribution des déchets B apparaît faible dans la mesure où elle n'excède pas 0,0005 mSv par an,
- la contribution des déchets C se situe également plusieurs ordres de grandeur en dessous des limites de référence retenues (0,0008 mSv par an en tenant compte du biais indiqué ci-dessus),
- dans le cas où le stockage de combustibles usés EDF (CU1 et CU2) serait considéré, leur impact serait de l'ordre de 0,02 mSv par an. Si les combustibles CEA (CU3) devaient être stockés, leur impact serait négligeable (inférieur à 0,0001 mSv par an).

Quelques commentaires peuvent éclairer ces résultats :

- le respect des valeurs de référence est acquis en prenant en compte, de manière conventionnelle, l'exutoire le plus pessimiste envisageable,
- les déchets B et C apportent de manière générale une contribution négligeable,
- dans le cas où le stockage de combustibles usés serait envisagé, celui-ci conduirait à un impact acceptable (dix fois inférieur à la valeur de référence), même en retenant un modèle de relâchement conservatif par rapport à la pratique internationale.

Impact des toxiques chimiques

Des calculs d'impact ont également été menés pour quelques toxiques chimiques représentatifs susceptibles d'être présents en quantité relativement importante dans les déchets HA et MA-VL (bore, sélénium, nickel, antimoine) :

- l'impact chimique du bore et du sélénium a été évalué pour les colis de déchets vitrifiés qui en contiennent les quantités les plus significatives,
- l'antimoine est présent en quantités sensiblement similaires dans les déchets vitrifiés, les déchets technologiques et les combustibles usés. On a traité le cas des déchets vitrifiés,
- le nickel est, quant à lui, apporté par les déchets métalliques et surtout par les aciers introduits au sein du stockage (conteneurs, chemisage, etc.). Il est difficile, à ce stade des études, de définir un inventaire détaillée des quantités de nickel et d'attribuer une cinétique de relâchement à chaque source potentielle. Ainsi, pour s'affranchir de ces incertitudes, l'Andra a adopté une approche pénalisante consistant à imposer une concentration à saturation en nickel, de manière continue jusqu'à la fin de simulation (un million d'années) et dans tout le stockage.

Les résultats des calculs d'impact sont exprimés à la fois en termes de concentration maximale dans l'exutoire (grandeur qui ne renseigne pas directement sur l'effet sanitaire, mais qui est plus simple à appréhender) et en termes d'excédent de risque individuel (ERI) pour les effets stochastiques sur la santé (effets cancérigènes) et de coefficient de danger (QD) pour les risques à effets de seuil (effets non cancérigènes). On considère en général un risque acceptable pour un ERI inférieur à 10⁻⁵ par an et un QD inférieur à 1. Ces indicateurs sont évalués sur le même groupe critique que pour les radionucléides. Parmi les quatre éléments étudiés, aucun n'est identifié comme cancérigène par ingestion et seul

le nickel est reconnu comme cancérigène par inhalation.

A l'échelle du million d'années, la forte sorption de l'antimoine dans les argilites du Callovo-Oxfordien conduit à son atténuation totale dans la barrière géologique. Son impact sur la biosphère est donc nul. Les résultats pour les autres toxiques sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Ces résultats montrent que l'impact des toxiques chimiques est négligeable.

Elément chimique (déchets concernés)	Concentration maximale à l'échelle d'un million	QD maximal - effets non cancérigènes		oncentration maximale QD maximal - effets non ERI maximal - effets non ERI maximal - effets non cancérigènes cancérigènes		al - effets gènes
	d'années [µg/l]	Ingestion	Inhalation	Ingestion	Inhalation	
Bore (C1/C2)	0,05	3.10-6	-	-	-	
Nickel (C1/C2)	0,001	6.10-5	5.10-4	-	3.10 ⁻⁹	
Sélénium (C1/C2)	0,00002	5.10-7	-	-	-	
Antimoine (C1/C2)	0	0	0	-	-	



Courbes d'isoconcentration montrant la progression du sélénium à 100 000 ans, 500 000 ans et un million d'années de gauche à droite au sein du Callovo-Oxfordien.

2.3.3 Les enseignements des analyses de sensibilité

L'évaluation précédente est complétée par les analyses de sensibilité qui permettent d'apprécier la robustesse des résultats en précisant si ces derniers sont plus ou moins sensibles à l'évolution de certains paramètres. Ces analyses permettent aussi de déterminer quels sont les paramètres influant le plus sur l'évaluation. Elles peuvent se ranger en deux catégories principales :

- un premier volet concerne les modèles de relâchement des colis de déchets. Dans la plupart des cas, on prend en compte des conditions plus pénalisantes, avec un relâchement plus rapide sauf pour les combustibles usés, où l'on prend en compte un modèle moins pénalisant fondé sur la dissolution classique conformément à la pratique internationale,
- un second volet concerne les paramètres caractérisant les argilites du Callovo-Oxfordien.

• La prise en compte de modèles de relâchement plus conservatifs pour les colis de déchets n'aurait qu'une influence très limitée, des marges existent pour certains colis.

La prise en compte de modèles et de paramètres conservatifs pour le relâchement par les colis a une influence réduite. Un relâchement plus rapide au niveau du colis ne change pas les débits en sortie de formation ni leur rythme d'apparition, compte tenu des temps de migration très longs dans le milieu géologique. Par exemple, la prise en compte d'une durée de vie de 1000 ans au lieu de 10000 ans pour les colis de déchets bitumés n'a pas de conséquence sur le calcul d'impact pour ces déchets.

Des progrès de la recherche, a priori accessibles, permettraient de disposer de marges de sûreté supplémentaires grâce à l'emploi de modèles plus réalistes pour certains verres et pour les combustibles usés :

 - pour la plupart des déchets C, le modèle retenu est celui reflétant le mieux la connaissance sur les verres, à savoir (V₀.S→Vr). Il s'agit d'un modèle assis sur des bases scientifiques solides. On a examiné en sensibilité

		Somme des déchets CU (CU1+CU2) scénario S2		Somme des déchets C1+C2 scénario S1b	
1. Pa	ramètres du COx	Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)	Dose cumulée maximale (mSv/an	Date de la dose maximale (ans)
1.1.	Perméabilité COX conservative (10 fois la valeur « phénoménologique »)	0,020(*) (idem référence)	330 000 (idem référence)	0,00047(*) (idem référence)	490 000 (idem référence)
1.2.	Paramètres de transfert et de rétention conservatifs	0,045	170 000	0,0037	200 000
1.3.	EDZ dégradée Zone fracturée : K = 10 ^e m/s, pas de géochimie, diffusion eau dans eau, Zone micro-fissurée : K = 5.10 ^e m/s, diffusion et géochimie conservatives	0,020(*) (idem référence)	330 000 (idem référence)	0,00047(*) (idem référence)	490 000 (idem référence)
2. Te	rme Source				
2.1.	Paramètres conservatifs du modèle de dissolution radiolytique pour les CU (vitesse de dissolution multipliée par 10 et fraction labile conservative)	0,020 (idem référence)	330 000 (idem référence)	Sans objet	Sans objet
2.2.	Modèle de contrôle par la solubilité de l'uranium pour les CU	0,0024	310 000	Sans objet	Sans objet

2.3.	Modèle V ₀ S pour les C	Sans objet	Sans objet	0,00063	280.000
2.4.	Relâchement labile pour les B (B1, B4, B5)	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet
2.5.	<i>Taux de relâchement des bitumes (B2)</i> taux = 10 [°] par an	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet

* : ces études n'ont pas fait l'objet de calculs de dose spécifiques et se sont limitées aux indicateurs intermédiaires (notamment flux de radionucléides en sortie de la formation du Callovo-Oxfordien). Les valeurs de ces indicateurs étant très peu différentes de celles pour la situation de référence, les doses sont inchangées.

les conséquences d'un modèle dégradé. Cela conduirait à augmenter sensiblement la contribution du chlore 36 à la dose finale, sans remettre en cause le respect de la limite de dose (dose cumulée de 0,00063 mSv par an pour les colis C0+C1+C2 et de 0,00049 mSv par an pour les colis C3+C4). Il serait intéressant de disposer de connaissances supplémentaires sur les types de verres auxquels il ne peut aujourd'hui être appliqué (colis C0),

- la prise en compte d'un modèle de relâchement des combustibles usés fondé sur la dissolution classique de l'uranium a une influence très sensible. En effet, il engendre des cinétiques nettement plus lentes de relâchement par la matrice d'oxyde (à l'échelle de plusieurs millions d'années). Ainsi, sur un million d'années, l'essentiel de la masse relâchée par les colis correspond à la fraction d'activité labile. L'impact total des CU est diminué d'un facteur dix (0,0024 mSv par an). Ce point est notable car le modèle testé en sensibilité est jugé plus réaliste au plan international que celui utilisé par l'Andra dans le calcul de référence.

· La perméabilité du Callovo-Oxfordien offre des marges de sûreté.

Les valeurs de perméabilité retenues en scénario de référence pour les argilites apparaissent robustes au vu des observations expérimentales. L'analyse de sensibilité a toutefois testé une perméabilité du Callovo-Oxfordien dégradée d'un facteur 10 (horizontalement et verticalement). Dans cette configuration, le mode de transport demeure diffusif sans que cela modifie de manière sensible les flux en sortie de l'argile. On peut donc en déduire que des marges de sûreté importantes sont apportées par le milieu géologique.

• Une dégradation des propriétés de rétention de l'argile modifie partiellement la liste des radionucléides atténués par la formation, mais n'entraîne pas d'évolution majeure de la dose à l'exutoire.

Dans ce volet de l'analyse de sensibilité, on a considéré des propriétés sensiblement dégradées de l'argile pour la rétention (solubilités augmentées, rétention diminuée) et le transport. Les temps de transfert des radionucléides et les temps d'apparition des maxima de flux de radionucléides en sont raccourcis (facteur 2,5 pour les éléments solubles et non sorbés dans le calcul de référence comme l'iode 129 et le chlore 36). Néanmoins,

		Somme des déchets C3+C4 scénario S1a		Somme des déchets B scénario S1b	
		Dose cumulée maximale (mSv/an	Date de la dose maximale (ans)	Dose cumulée maximale (mSv/an	Date de la dose maximale (ans)
1.1.	Perméabilité COX conservative (10 fois la valeur « phénoménologique »)	0,00036(*) (idem référence)	500 000 (idem référence)	0,00047(*) (idem référence)	310 000 (idem référence)
1.2.	Paramètres de transfert et de rétention conservatifs	0,0028	210 000	0,00079(**)	220 000
1.3.	EDZ dégradée Zone fracturée : K = 10 ^e m/s, pas de géochimie, diffusion eau dans eau, Zone micro-fissurée : K = 5.10 ^e m/s, diffusion et géochimie conservatives	0,00036(*) (idem référence)	500 000 (idem référence)	0,00047(*) (idem référence)	310 000 (idem référence)

2.1.	Paramètres conservatifs du modèle de dissolution radiolytique pour les CU (vitesse de dissolution multipliée par 10 et fraction labile conservative)	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet
2.2.	Modèle de contrôle par la solubilité de l'uranium pour les CU	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet
2.3.	Modèle V _o S pour les C	0,00049	290 000	Sans objet	Sans objet
2.4.	Relâchement labile pour les B (B1, B4, B5)	Sans objet	Sans objet	0,00047 (idem référence)	Sans objet
2.5.	<i>Taux de relâchement des bitumes (B2)</i> taux = 10 ³ par an	Sans objet	Sans objet	0,00047 (idem référence)	310 000 (idem référence)

** : l'étude de sensibilité a été conduite sur les déchets CSD-C qui contribuent le plus fortement à la dose. Pour comparaison, la dose calculée en référence est de 0,00033 mSv par an. seuls les éléments déjà mentionnés précédemment et peu retenus dans le milieu géologique (iode 129, chlore 36, sélénium 79) présentent des flux significatifs en sortie de la barrière géologique. On note toutefois une contribution minime de quelques éléments comme le béryllium 10 ou le carbone 14. L'absence de contribution d'autres éléments souligne la remarquable capacité des argilites à les confiner.

En termes d'évaluation de dose, on peut comparer les deux situations pour les combustibles usés (CU1+CU2) qui constituent le cas le plus pénalisant. Pour l'exutoire le plus pénalisant (Saulx), on passe d'une dose de 0,020 mSv par an à une dose de 0,045 mSv par an, très largement inférieure aux références réglementaires. On note cependant un temps d'apparition du maximum de dose sensiblement raccourci (170 000 ans pour 330 000 ans). En tout état de cause, cela ne remet pas en question les capacités de rétention du milieu et le respect des limites de dose.

• La zone endommagée autour des ouvrages ne joue qu'un rôle modeste.

En analyse de sensibilité, on a considéré une zone endommagée dont les propriétés de perméabilité seraient dégradées d'un facteur supérieur à 100 et dont les propriétés géochimiques seraient soit inexistantes, soit sensiblement plus pessimistes.

Cette configuration joue principalement sur la fonction du stockage « s'opposer à la circulation d'eau ». Ainsi, dans le cas de l'iode, la fraction susceptible de se trouver dans le puits passe de 3.10⁻⁵% à 0,17%. La progression est sensible en relatif, mais la quantité absolue demeure négligeable. Le mode de transfert diffusif demeure dominant. En effet, la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien limite fortement les flux d'eau circulant dans les ouvrages. Dans de telles conditions, même en considérant que les scellements sont peu efficaces, l'apport d'eau n'est pas suffisant dans le stockage pour alimenter une circulation par la zone endommagée. On n'observe pas d'évolution sensible des doses à l'exutoire dans cette configuration par rapport au cas de référence. Ces résultats soulignent la robustesse d'ensemble du concept par rapport à une zone endommagée dont les propriétés seraient dégradées.



Répartition de la masse à travers les différents compartiments de calculs (iode 129 des CU1)

En conclusion, les analyses de sensibilité permettent d'éprouver la fiabilité des résultats acquis dans le cadre du scénario d'évolution normale. Elles ont en particulier visé à tester les paramètres principaux gouvernant les fonctions de sûreté du stockage. Trois enseignements peuvent être tirés :

- le maintien du régime diffusif dans le stockage apparaît acquis, même dans des conditions très sensiblement dégradées. En particulier, une zone endommagée dotée de propriétés pénalisantes n'aurait que peu d'impact sur l'évaluation finale. Il en va de même d'une dégradation des propriétés de perméabilité de la roche saine,
- une diminution des propriétés géochimiques de la roche ne serait pas de nature à remettre en cause les conclusions principales des calculs de référence,
- des pistes de progrès intéressantes existent sur certains modèles de relâchement des colis de déchets. Elles offrent des réserves pour l'analyse de sûreté.

Ainsi, les principaux paramètres régissant la performance, à savoir la perméabilité et les caractéristiques géochimiques, apparaissent suffisamment robustes pour assurer le maintien des fonctions de sûreté, y compris dans des configurations sensiblement plus pessimistes que ce qui est attendu.

2.4 L'évaluation de performance en situation altérée

2.4.1 Orientations pour la définition des situations altérées

Le scénario d'évolution normale et le modèle de sûreté associé constituent une représentation « enveloppe » des évolutions les plus probables du stockage. Toutefois, afin de prendre en compte l'ensemble des incertitudes et d'explorer des situations peu probables, la démarche de sûreté a aussi défini des scénarios différents aboutissant à une évolution autre que celle décrite dans le scénario d'évolution normale, du fait d'incertitudes ou de risques globalement peu probables.

Ce volet de la démarche de sûreté a pour but d'explorer les divers dysfonctionnements possibles du système de stockage sous forme de situations dites « altérées ». On souhaite ainsi vérifier si les conséquences de ces dernières demeurent acceptables. Ces situations sont regroupées dans quelques scénarios dits d'évolution altérée (SEA).

La détermination de ces scénarios d'évolution altérée s'est fondée sur un exercice méthodologique dénommé analyse qualitative de sûreté, qui vise à sélectionner les facteurs les plus pertinents à prendre en considération. Pour ce faire, on a procédé à une revue des données phénoménologiques décrivant l'évolution du stockage dans le temps et dans l'espace afin de cibler quelles pouvaient être les incertitudes principales et d'identifier les défaillances dues aux composants du stockage. Parallèlement, une réflexion a été conduite sur les événements susceptibles de survenir dans son environnement. Il s'agit de risques externes, d'origine humaine ou naturelle. Pour compléter le travail, cette analyse a été comparée avec le résultat des travaux menés dans le cadre international (OCDE/AEN).

Au terme de cet examen, on a retenu trois scénarios d'évolution altérée : le défaut de conteneur, le défaut de scellement, la réalisation d'un forage intrusif. Ces divers cas de figure permettent d'examiner la robustesse des fonctions du stockage :

- pour la fonction « s'opposer à la circulation d'eau », le scénario de défaillance combinée des ancrages des scellements (galeries et alvéoles B) et des bouchons d'alvéoles C et CU apparaît comme un test pertinent,
- la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser » est assurée par divers composants selon les périodes : conteneurs dans un premier temps (pour les déchets C et les combustibles usés), matrices des déchets, forme physico-chimique des éléments relâchés, conditions chimiques et hydrauliques dans les alvéoles (rôle de la formation géologique). Il est difficile de définir un scénario couvrant les défaillances de l'ensemble de ces composants. La défaillance des conteneurs de déchets exothermiques, permettant à la fois un relâchement anticipé des radionucléides et une diffusion en ambiance thermique, accélérant a priori la diffusion hors du champ proche, constitue un outil de test privilégié,
- la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides » fait en particulier appel à la formation-hôte, même si les corps de scellements et les alvéoles interviennent également. Le scénario du forage intrusif interceptant les formations géologiques et le stockage en divers endroits permet d'apprécier le comportement du stockage dans cette situation dégradée mettant à l'épreuve sa fonction de retard et d'atténuation.

Les trois scénarios illustrent donc les principaux cas de défaillance des fonctions. Ils ne décrivent pas l'ensemble des combinaisons possibles mais seulement celles qui sont apparues entraîner des conséquences significatives. Il est enfin apparu utile, en complément de l'ensemble des SEA définis précédemment, d'en étudier un quatrième qui prenne en compte *une dégradation généralisée des fonctions de sûreté*. Il ne se fonde ni sur le retour d'expérience des scénarios définis par les homologues de l'Andra, ni sur les situations altérées identifiées. *Il s'agit d'un scénario de « fonctionnement très dégradé », consistant à réduire de manière systématique les performances des fonctions de sûreté, en les plaçant nettement hors de la plage anticipée dans le domaine d'évolution normale, voire altérée.*

Les résultats des calculs de sûreté associés aux situations altérées doivent également être comparés à des seuils. La Règle fondamentale de sûreté n'en fournit pas, dans la mesure où il apparaît difficile de définir de manière générique l'acceptabilité des situations altérées. En effet, ces situations sont « enveloppes » de plusieurs évolutions altérées, elles-mêmes issues de causes diverses. S'il est possible d'évaluer la vraisemblance de chaque situation altérée, il est plus délicat de juger de la vraisemblance d'un scénario qui peut en représenter plusieurs, sous des hypothèses stylisées. On peut toutefois retenir de manière simple que :

- le critère de 0,25 mSv par an est conservé comme une référence parmi d'autres, c'est-à-dire qu'on compare les résultats obtenus par le calcul à cette valeur, sans imposer que la dose calculée respecte nécessairement cette contrainte,
- jusqu'à quelques mSv par an (au maximum 10), on peut considérer un SEA comme acceptable sur une base
au cas par cas si la vraisemblance des situations décrites est suffisamment faible. En tout état de cause, on cherche à réduire l'impact de ces situations altérées par les moyens appropriés,

- un impact calculé dépassant la dizaine de mSv doit faire l'objet d'une attention particulière. Le caractère éventuellement trop enveloppe du scénario doit alors être examiné. Dans le cas de situations purement hypothétiques, un tel impact n'est cependant pas nécessairement inacceptable en soi.

2.4.2 Les conséquences d'une absence de performance des scellements

Le scénario dit « défaut de scellement » a pour objectif de traiter différentes combinaisons de défaillances des scellements du stockage (puits, galeries et fractionnement de modules) puis des bouchons d'alvéoles. On inclut dans ce scénario tout défaut qui pourrait être lié au développement d'une zone endommagée autour des ouvrages constituant une voie de transfert des radionucléides. Ce scénario conduit à envisager :

- un court-circuit partiel de la barrière géologique. Les radionucléides pourraient alors transiter préférentiellement par les galeries et les puits, vers la surface selon un mode de transport convectif ;
- une modification des conditions d'environnement hydrique et chimique dans les alvéoles, qui engendre la défaillance de la fonction de protection des colis.

Différentes combinaisons sont envisagées : défaillance de tous les scellements de galerie, défaillance du scellement de puits seul, défaillance de l'ensemble des scellements. Une situation où le stockage est abandonné sans que le puits soit fermé est également traitée.



Coupe verticale module de stockage C1/C2

Coupe horizontale module de stockage C1/C2

Représentation de l'incidence de la défaillance de l'ensemble des scellements sur la distribution des champs hydrauliques dans le stockage

Le traitement numérique de ces situations souligne que l'impact reste très faible. Plus particulièrement, plusieurs résultats ont été mis en évidence du point de vue de l'hydraulique :

- dans les cas de défaillance partielle des scellements (scellements de puits ou de galeries), la perturbation hydraulique du stockage reste limitée du fait de l'efficacité du ou des scellements non défaillants qui agissent en redondance des scellements défaillants,
- en cas de défaillance simultanée de tous les scellements de puits et de galeries, la perturbation hydraulique est évidemment plus forte, mais reste limitée du fait notamment de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien et de l'architecture en cul-de-sac.

Dans la continuité de ce qui est observé par les études de sensibilité sur la zone endommagée en scénario d'évolution normale, l'apport d'eau au sein du stockage n'est pas suffisant pour permettre une circulation dans les ouvrages d'accès.



Répartition de la masse à travers les différents compartiments de calcul - SEA tous scellements défaillants (iode 129 des CU1)

Quelles que soient les situations de défaillance de scellements étudiées, l'impact associé à la fraction d'activité qui migre par les ouvrages est négligeable devant celle qui diffuse au travers du milieu géologique. La dose à l'exutoire n'est pas donc modifiée.

Les scellements jouent un rôle important dans la fonction « s'opposer à la circulation d'eau » mais le milieu géologique mobilisé par l'architecture arborescente en cul-de-sac assure une redondance en limitant les apports d'eau, même en cas de défaillance de tous les scellements. L'efficacité des fonctions de sûreté du stockage ne repose que partiellement sur les scellements. En particulier, la sûreté ne se fonde pas sur un composant unique dont la défaillance serait particulièrement préjudiciable. Cela conforte la démarche d'ensemble en montrant combien les différents éléments du stockage se combinent et se « relaient », le cas échéant, pour assurer la robustesse d'ensemble du système.

2.4.3 Les conséquences de défaillances prématurées des conteneurs

Un scénario dit « défaut de colis » envisage que des conteneurs sont mal fabriqués en série pendant un mois (ce qui conduit à respectivement 50 conteneurs de déchets C et 30 conteneurs de combustibles usés défaillants). Les conteneurs défaillants perdent toute forme d'étanchéité un siècle environ après la production du colis primaire.

L'impact de cette défaillance est mineur dans la mesure où la capacité du milieu géologique à retenir les radioéléments, bien que diminuée dans les premiers temps par le fait que les radionucléides diffusent en environnement chaud, reste globalement efficace. Les impacts apparaissent plus tôt mais ne sont pas différents de ceux du scénario d'évolution normale.

On a également traité un cas de *défaillance complète de tous les conteneurs* de déchets C et de combustibles usés. Ce cas permet d'apprécier de manière globale l'impact de la rupture prématurée des conteneurs. Cette situation est très pénalisante et purement conventionnelle, dans la mesure où aucune cause identifiée ne peut provoquer une défaillance aussi prématurée de l'ensemble de l'inventaire :

- dans ce cas, les flux de radionucléides du Callovo-Oxfordien sont plus importants pendant les 100000 premières années. Malgré ces écarts, on note que la masse d'iode 129 relâchée par le Callovo-Oxfordien sur

la durée totale de l'analyse n'est supérieure que d'un faible pourcentage,

- pour les combustibles usés, cela n'induit toutefois pas de différence significative dans la mesure où les vitesses de diffusion demeurent très lentes au-delà de la période thermique, avec une épaisseur significative de Callovo-Oxfordien,
- pour les déchets C vitrifiés, le comportement est différent car le relâchement par les colis défaillants est accéléré par les conditions thermiques. Contrairement à la situation d'évolution normale, la durée de relâchement devient courte devant les temps de transfert diffusif, contrairement au cas des colis non défaillants. Ainsi, la quantité d'iode 129 relâchée par le Callovo-Oxfordien sur un million d'années est supérieure d'environ 10%. Cela demeure toutefois une différence modeste.

La dose à l'exutoire n'est pas modifiée. En revanche, la date d'apparition des maxima de dose est plus précoce.

(Saulx - modèle hydrogéologique à 1 million d'années)						
	SEA tous colis défaillants		SEN (rappel)			
	Dose cumulée	Date de la dose	Dose cumulée	Date de la dose		
	maximale	maximale	maximale	maximale		
	(mSv/an)	(ans)	(mSv/an)	(ans)		
Tous déchets C						
(C0, C1+C2 scénario S1b,	0,0012	270 000	0,00083	490 000		
C3+C4 scénario S1a)						
Combustibles usés CU1+CU2	0.001	000.000	0.000	000.000		
scénario S2	0,021	290 000	0,020	330 000		

Synthèse des doses maximales à l'exutoire le plus pénalisant (Saulx - modèle hydrogéologique à 1 million d'années)

Le traitement du scénario « défaut de colis » met en évidence que la défaillance prématurée de quelques conteneurs ou surconteneurs n'induit pas de modification de l'impact global du stockage. L'effet d'un relâchement prématuré de radionucléides sur la fonction de retard et d'atténuation est faible car la durée du transitoire thermique est courte devant le temps de transfert global dans la barrière géologique.

Dans le cas pénalisant de la défaillance de tous les conteneurs et surconteneurs, l'effet d'un relâchement prématuré de radionucléides est visible en sortie du Callovo-Oxfordien, avec des dates d'apparition plus précoces des maxima de débit molaire. La barrière géologique joue un rôle important car les dates d'apparition des maxima demeurent éloignées (au-delà de la centaine de milliers d'années). L'impact sur le niveau de la dose est négligeable.

2.4.4 L'évaluation des risques d'intrusion au sein du stockage

Un scénario, dit de « forage », envisage différentes situations où un individu creuserait un ou des forage(s) au travers du stockage, puis les abandonnerait sans les refermer. Bien qu'il n'y ait a priori aucune ressource exploitable sur le site de Meuse/Haute-Marne (ressources pétrolière, géothermique, etc.), cette situation couvre un cas d'exploration par des individus pouvant chercher des ressources. Les situations considérées résultent de l'abandon d'un ou plusieurs forages (doublet de forages). Ce(s) dernier(s) crée(nt), en fonction de sa (leur) localisation par rapport aux ouvrages, un court-circuit partiel ou total de la formation-hôte.

Le cas étudié considère une situation très pénalisante d'un forage pérenne (cas peu vraisemblable, mais enveloppe de l'impact pouvant résulter de la réalisation successive de plusieurs forages dans des zones proches) qui traverse un ouvrage du stockage. On retient de le placer à proximité des colis, dans un ouvrage de diamètre suffisant pour que son interception ne soit pas trop peu probable : une galerie à proximité immédiate d'une alvéole de déchets C ou de combustibles usés et dans l'alvéole de déchets B. De surcroît, on considère qu'il se situe à proximité d'un pompage d'alimentation en eau potable (AEP).

Les résultats des calculs montrent qu'un tel forage n'aurait qu'un effet limité sur le stockage et son comportement. D'un point de vue hydraulique, l'efficacité des divers dispositifs de conception, en particulier les scellements et le fractionnement du stockage, limite l'influence du forage aux alvéoles à proximité du forage. Le forage n'est donc pas en situation de drainer une eau contaminée à partir de la formation-hôte qui en contient, en tout état de cause, fort peu. Même la situation de doublet de forages n'est pas susceptible d'induire une circulation entre les deux forages conduisant à une augmentation significative du transport de radionucléides.

La dose liée à l'exploitation du forage d'eau potable est au plus de 0,012 mSv par an dans le cas d'un forage interceptant une galerie de stockage ou une alvéole de stockage. Les maxima de dose apparaissent néanmoins



ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le comportement et la sûreté à long terme du stockage et de son environnement

plus tôt compte tenu de la date d'occurrence du forage choisie volontairement précoce en cohérence avec les recommandations de la RFS.III.2.f.

Pour prudence, on a également considéré une situation encore moins probable et extrêmement pénalisante, dans laquelle un forage atteindrait une alvéole de combustibles usés CU1 (le diamètre des alvéoles CU étant significativement inférieur au diamètre des alvéoles B). Dans ce cas, la dose due au forage n'est que de 0,10 mSv par an.

On a également étudié en sensibilité l'influence possible d'une zone endommagée dont les propriétés de perméabilité seraient dégradées, ce qui diminue la performance des scellements. Ce cas extrêmement pénalisant peut s'apparenter à une situation doublement altérée. Le calcul a été mené pour les déchets C2. La dose due au forage s'avère très peu modifiée (0,00067 mSv par an contre 0,00065 mSv par an dans le calcul de référence).

Synthèse des doses

	Dose maximale (pompage AEP Barrois) (mSv/an)	Date d'apparition de la dose maximale (ans)
Forage interceptant une galerie de stockage		
C2	0,00065	25 000
C4	0,00053	23 000
CU1	0,0072	42 000
CU2	0,0012	43 000
Forage interceptant une alvéole de stockage		
B1, B5 non organique	0,012	770
B2 (boues bitumées)	0,00022	12 000

L'étude du scénario forage intrusif dans le stockage souligne que le système de stockage est robuste face à ce type d'événements externes. La faible perméabilité de la barrière géologique, dont l'architecture en cul-de-sac tire parti, l'efficacité des scellements ainsi que le confinement supplémentaire apporté par les colis de déchets concourent à limiter l'impact associé à un éventuel court-circuit partiel de la barrière géologique.

2.4.5 L'hypothèse d'une dégradation simultanée des fonctions du stockage

Le dernier scénario examiné est purement conventionnel : il a consisté à retenir simultanément, de manière arbitraire, des valeurs conservatives ou pénalisantes pour tous les paramètres de calculs. Cela revient à dégrader l'ensemble des composants du stockage simultanément, en ne leur accordant qu'une performance minimale (roche-hôte de perméabilité plus élevée, relâchement labiles pour la majorité des déchets B, matrices des déchets bitumineux, vitrifiés et des combustibles usés à la limite basse de performance prédite par les modèles, scellements contournés par une zone endommagée de forte perméabilité).

Ce scénario est représenté de la manière suivante :

- pour la fonction « s'opposer aux circulations d'eau », on prend une valeur de perméabilité des argiltes saines de l'ordre de 10⁻¹²m/s correspondant aux valeurs les plus hautes observées. Pour la zone endommagée, on adopte une vision pénalisante avec une perméabilité de 10⁻⁶m/s pour la zone fracturée et de 5.10⁻⁹m/s pour la zone microfissurée. On ne retient aucune propriété géochimique pour la zone fracturée et des propriétés dégradées pour la zone microfissurée. De ce fait, les scellements ont des performances très faibles, similaires à celles considérées dans le scénario d'évolution altérée « défaut de scellement ». A titre complémentaire, on considère aussi une dégradation de la perméabilité du remblai ;
- pour la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage », on retient des modèles de relâchement conservatifs pour l'ensemble des colis types du modèle d'inventaire ;
- *pour la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides »,* on retient des valeurs conservatives pour les paramètres de transport et de rétention dans l'argile.

L'impact de cette situation très altérée et conventionnelle reste cependant très proche de celui du scénario d'évolution normale. Dans la situation la plus pénalisante (exutoire Saulx le plus proche du site), les impacts calculés sont inférieurs à la valeur de 0,25 mSv par an.

	Modèle hydrogéologique à 1 Ma		
	Dose cumulée	Date de la dose	
	maximale	maximale	
	(mSv/an)	par an	
Tous déchets B scénario S1b	0,0030	160 000	
Tous déchets C (C0, C1+C2 scénario S1b, C3+C4 scénario S1a)	0,0054	170 000	
Combustibles usés CU1+CU2 scénario S2	0,12	150 000	

Synthèse des doses maximales à l'exutoire le plus pénalisant (Saulx)

Cette situation de dégradation simultanée de l'ensemble des fonctions du stockage constitue une hypothèse conventionnelle qui ne présente aucun caractère réaliste. On peut donc juger que cette situation présente une approche prudente de l'évolution la plus pessimiste du stockage, mais aussi que sa vraisemblance est proche de zéro. Pour autant, la dose calculée à l'exutoire apparaît faible pour une configuration de cette nature et elle est nettement inférieure à 0,25 mSv par an. *Cela souligne l'étroite complémentarité entre les différentes fonctions de sûreté du stockage et l'utilité de cette approche par fonctions. En effet, bien que les trois fonctions voient leurs performances individuelles dégradées, leur combinaison permet encore d'assurer la sûreté du stockage.*

3. Bilan sur la robustesse du concept de stockage

Les recherches conduites depuis le début du programme de recherche de l'Andra ont apporté une connaissance détaillée de chacun des composants du stockage. Toutefois, cette connaissance de chaque composant élémentaire et de ses propriétés caractéristiques n'est qu'une étape. En effet, le système de stockage met en regard de nombreux composants qui interagissent les uns avec les autres. La deuxième partie du travail scientifique a donc consisté à déterminer, analyser et évaluer les grands phénomènes présents au sein du stockage pour en jauger l'importance et en donner une représentation détaillée. Parallèlement, le concepteur a proposé des architectures de stockage parmi celles les mieux à même de tirer parti du milieu géologique.

La troisième étape a consisté à exploiter ces données pour apprécier la robustesse du stockage et voir comment, ainsi conçu et représenté, il répondait aux exigences de sûreté. Cela supposait un travail de nature différente visant :

- d'une part, à se doter d'une compréhension simplifiée, mais prudente, du fonctionnement du stockage dans le cadre de l'établissement d'un modèle de sûreté. Cette schématisation avait pour but de mettre en exergue les phénomènes majeurs et de s'assurer que les hypothèses retenues pour représenter le stockage constituaient *a priori* une vision conforme ou pessimiste par rapport à la réalité la plus probable;
- d'autre part, à prendre en compte les inévitables incertitudes subsistant dans la connaissance, sous forme de variantes plus prudentes, mais moins réalistes, ou de scénarios de type altéré traduisant des dysfonctionnements majeurs du système.

Tous ces éléments ont fait l'objet de l'analyse de sûreté présentée dans ce chapitre. Elle a permis de définir un scénario d'évolution normale du stockage et le modèle de sûreté associé. Ces derniers s'appuient sur une vision simplifiée du stockage, retenant pour les domaines où des incertitudes subsistent des valeurs conservatives ou pénalisantes. Ils attestent de la possibilité de donner une représentation à la fois prudente, mais aisément appréhendable du stockage.

L'un des buts premiers de l'analyse était d'examiner la pertinence des fonctions de sûreté imparties au stockage. En effet, ces fonctions traduisent les attentes envers un dispositif de stockage, attentes qui fondent elles-mêmes l'intérêt de ce système technique.

ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Le comportement et la sûreté à long terme du stockage et de son environnement

Au moyen de divers indicateurs, l'analyse a montré que les trois fonctions de sûreté principales (« s'opposer à la circulation de l'eau », « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser à l'intérieur du stockage », « retarder et atténuer la migration des radionucléides ») étaient remplies efficacement par le dispositif proposé. Elle a souligné que ce constat valait non seulement en situation normale, représentative des évolutions les plus probables, mais aussi dans des configurations nettement plus pénalisantes. Une dégradation sensible des performances du milieu géologique et des composants n'empêcherait pas le stockage de remplir ses fonctions. En particulier, le régime de transport dans et autour du stockage demeure diffusif, y compris dans des conditions très dégradées par rapport à toutes les observations et mesures actuelles sur les propriétés du milieu géologique. De plus, la prise en compte de scénarios de type altéré ne remet pas en cause cette conclusion. A ce stade, le stockage apparaît donc robuste dans toutes les configurations envisagées au regard de ses fonctions de sûreté.

Par ailleurs, l'analyse a montré que le stockage ne dépendait pas de manière excessive d'un seul de ses composants. Tous contribuent de manière sensible, mais non prépondérante, à la sûreté d'ensemble. Ainsi, les scellements jouent un rôle important, mais ne sont pas susceptibles à eux seuls de remettre en cause le fonctionnement général du stockage. Il en va de même pour les conteneurs C et CU, qui préviennent un relâchement dans des conditions diffusives avec effet thermique. Cette complémentarité entre les divers éléments apparaît comme un facteur supplémentaire de robustesse, dans la mesure où elle assure que, dans la très grande majorité des configurations, les fonctions de sûreté pourront être assurées.

La formation géologique hôte joue un rôle majeur puisqu'elle apporte une contribution sensible à la maîtrise de l'impact non seulement en situation normale, mais également dans des situations conventionnelles pessimistes de défaut de divers composants ou d'intrusion dans le stockage. Cette performance est modélisée avec des valeurs prudentes pour caractériser ses propriétés, ce qui, là encore, ne fait pas reposer la sûreté sur un élément unique et participe de la défense en profondeur qui doit présider au bon fonctionnement du stockage. La présence de plusieurs éléments qui peuvent prendre le relais l'un de l'autre en cas de défaillance constitue ainsi une valeur ajoutée forte de la conception actuelle du stockage.

Au terme des calculs effectués dans le cadre du modèle de sûreté en évolution normale, les performances du stockage répondent, avec des marges importantes, aux objectifs de dose recommandés par la RFS III.2.f. De manière générale, les scénarios incidentels ou altérés n'entraînent qu'une augmentation modeste de la dose à l'exutoire. Cela prouve que, même dans des situations peu vraisemblables, le stockage constitue un concept efficace.

De manière plus précise, les impacts engendrés par les déchets C et les colis de moyenne activité à vie longue (déchets B) se situent plusieurs ordres de grandeur au-dessous de la norme de référence fixée à un quart de la dose admissible pour le public (0,25 mSv/an) et environ un dixième de la radioactivité naturelle à laquelle le public est confronté. Pour les combustibles usés, qui ne sont pas aujourd'hui considérés comme des déchets et ne sont donc pris en compte qu'à titre exploratoire, la dose est dix fois inférieure à la référence.

L'analyse a également testé une configuration de dégradation de l'ensemble des fonctions du stockage dans laquelle les conteneurs ne sont plus étanches, les scellements sont très peu efficaces, les performances du milieu géologique sont très sensiblement affaiblies avec des valeurs pessimistes. Cette situation, hautement hypothétique dans la mesure où elle signifierait que tous les composants présentent soit une défaillance, soit des propriétés très sensiblement inférieures à ce qui a été observé ou modélisé, demeure conforme aux limites assignées en situation normale.

Nonobstant ces résultats positifs, l'analyse de sûreté a également mis en valeur des incertitudes résiduelles et des marges de progrès potentiel qui fourniront des orientations utiles pour d'éventuels développements ultérieurs. En effet, l'approche de sûreté a délibérément donné une représentation pénalisante ou conservatrice de certains phénomènes ou composants (modèle de relâchement du combustible usé, rôle des formations encaissantes, zone endommagée...). Cette représentation permet de ne prendre en compte que des résultats attestés et sera précisée avec les expériences à venir. Des marges de sûreté existent donc. Elles ne sont pas caractérisées à ce stade mais constituent autant de réserves qui peuvent être mobilisées et apportent une confiance supplémentaire en la pertinence du dispositif de stockage et sa capacité à protéger efficacement l'homme et l'environnement d'une exposition aux effets des déchets radioactifs.

En conclusion, la démarche de sûreté vient étayer l'étude de faisabilité du stockage. Au vu des connaissances actuelles et en retenant des hypothèses prudentes, les conséquences que pourraient entraîner, pour l'homme et l'environnement un éventuel, stockage apparaissent conformes aux normes en vigueur. Il est important de noter que cette conclusion est obtenue en négligeant certaines marges de sûreté et les enseignements qu'apporterait la phase d'exploitation et de réversibilité du stockage.

223

Conclusion

La loi du 30 décembre 1991 a initié un processus de recherche sur différentes voies de gestion des déchets de haute activité et à vie longue. Dans ce cadre, l'Andra a conduit les travaux pour étudier la possibilité d'un stockage en formation géologique profonde, en considérant deux roches de nature différente, l'argile et le granite. Pour le milieu argileux étudié sur le site de Meuse/Haute-Marne, quelques conclusions peuvent être mises en exergue.

I. Quinze années de progrès considérable dans le domaine de la recherche

Le stockage en formation géologique profonde est étudié depuis les années soixante dans plusieurs pays occidentaux. Toutefois, la période 1991-2005 a marqué en France une accélération de l'avancement des recherches. De ce point de vue, la loi du 30 décembre 1991 a eu un rôle de catalyseur. Le calendrier qu'elle assigne a conduit à mobiliser les compétences et à concentrer les énergies en vue de produire en 2005 un dossier qui soit assis sur des bases scientifiques et techniques solides.

· Le franchissement d'une étape importante dans la connaissance

L'évaluation de la faisabilité d'un stockage nécessite l'acquisition de connaissances et des études sur des champs variés : comportement des déchets et des matériaux, histoire et propriétés du milieu géologique, conception d'architectures, compréhension des phénomènes se déroulant dans un stockage, modélisations des interactions, évaluation de sûreté. Sur tous ces thèmes, la moisson de résultats a été particulièrement riche. Quinze années de recherche ont établi les fondements d'une connaissance scientifique et technique solide, permettant de dessiner une vision précise des grands enjeux et des propriétés de tous les composants du stockage.

Aujourd'hui, on dispose, par exemple, d'une vision de l'histoire de la couche d'argilites étudiée sur le site de Meuse/Haute-Marne depuis son dépôt, il y a 155 millions d'années. Les argilites du Callovo-Oxfordien ont été scrutées de manière extrêmement attentive, que ce soit sur échantillons ou *in situ*, autorisant désormais une connaissance intime de ses propriétés. Dans ce domaine, le degré de maturité atteint place ces études au front avancé de la connaissance sur la géologie du bassin parisien.

• L'atout du site de Meuse/Haute-Marne où a été mis en œuvre un large éventail de techniques de mesures et d'investigations

Dans le cas de l'étude du milieu argileux, un apport décisif de la période aura été la possibilité de réaliser des investigations très poussées sur le site de Meuse/Haute-Marne. Depuis 1994, l'Andra a exploré le site et ses environs et a acquis une maîtrise concrète de la réalité du milieu géologique.

Avec ses deux puits, et près de 100 m de galeries, *le Laboratoire souterrain de Meuse/ Haute-Marne constitue aujourd'hui un outil scientifique de premier plan, comparable aux réalisations internationales similaires. Il a produit des données très significatives et constitue un atout précieux pour les prochaines années. Il sera en mesure, si on le souhaite, d'accompagner une démarche d'étude et de conception détaillée par la production de chroniques de mesures sur de longues durées, venant compléter les résultats déjà acquis.*

Pour étudier le site de Meuse/Haute-Marne, l'Andra s'est attachée à mobiliser la plus large gamme possible d'outils de mesures et de technologies de reconnaissance. L'exploration du milieu géologique argileux constitue en effet une entreprise complexe, nécessitant des technologies très pointues, par exemple pour mesurer la perméabilité d'un milieu très peu perméable ou caractériser l'eau présente en très faible quantité dans la roche, ce qui rend son extraction délicate.

Dès le début du programme de recherche, l'Andra a noué des liens forts avec tous ses homologues étrangers de manière à transposer, élaborer ou valider les technologies d'investigation qui lui étaient nécessaires. Ce travail préparatoire a permis ensuite d'être immédiatement opérationnel sur le site de Meuse/Haute-Marne.

Ces quinze années ont donc vu le développement et le perfectionnement d'un vaste ensemble de technologies de mesure et de caractérisation portées à leur meilleur niveau. Par exemple, les technologies pétrolières ont été adaptées et perfectionnées pour aboutir à une exploration minutieuse de la géologie. L'ensemble des facettes possibles des moyens d'investigation a été utilisé : observations depuis la surface (par exemple avec la campagne de sismique), mesures sur échantillons, travail en forages verticaux ou déviés quasiment horizontaux, caractérisations dans les puits et les galeries. *La diversité des outils expérimentaux mis en œuvre autorise une complémentarité et une redondance entre les mesures, ce qui renforce la confiance dans les résultats obtenus.*

· Les confirmations apportées par les laboratoires souterrains étrangers

En parallèle du programme conduit sur le sol français, les laboratoires souterrains étrangers ont joué un rôle très important par leur apport méthodologique et théorique, en particulier ceux de Mol en Belgique et du Mont Terri en Suisse. Le Laboratoire de Mol a vu le développement des technologies de mesures pour appréhender tous les phénomènes présents dans l'argile. Le Laboratoire du Mont Terri a permis de préparer les expériences menées à Bure en offrant la possibilité d'une répétition en vraie grandeur. De plus, la nature similaire des deux argiles (argiles à Opalinus en Suisse et argilites du Callovo-Oxfordien) a conduit à établir un point essentiel : *au Mont Terri, il a été montré que les résultats établis sur échantillons étaient aussi représentatifs des essais à grande échelle.* Cela constitue un support de poids pour les travaux menés à Bure. De plus, les modèles élaborés sur les échantillons extraits à Bure ont été corroborés *in situ* au Mont Terri.

Les laboratoires étrangers ont ainsi apporté une validation méthodologique et théorique à la démarche d'analyse conduite en France.

• La mobilisation d'une communauté scientifique de haut niveau et une insertion des recherches au niveau international

Un autre acquis essentiel du programme de recherche mené depuis 1991 réside dans la mobilisation de la communauté scientifique. Au lancement du processus, les recherches demeuraient relativement confinées à un cercle de spécialistes ou à un petit nombre d'entités en charge des travaux. Tout l'effort de l'Andra a consisté à amener la communauté scientifique la plus large possible à s'intéresser à ses travaux. En d'autres termes, plutôt que d'internaliser les études et recherches ou de développer en propre certaines compétences, elle a toujours préféré avoir recours aux meilleurs laboratoires existant français ou internationaux, sur chaque thématique. Susciter l'intérêt des scientifiques et les familiariser avec les problématiques concernées a représenté un important travail.

Au final, cette politique a été fructueuse. Elle a permis de rassembler autour du thème du stockage près d'une centaine de laboratoires au niveau national et international. Issus d'horizons différents, ces laboratoires ont pu mettre en commun leurs compétences, développer des coopérations et des perspectives interdisciplinaires. Cela est d'autant plus important que l'originalité des recherches sur le stockage tient justement à la nécessité de mobiliser des domaines scientifiques très variés pour disposer d'une compréhension d'ensemble. Parallèlement, l'Andra a mis en place des actions de soutien à la formation par la recherche, sous forme de bourses de thèses, qui ont permis de disposer de forces vives scientifiques : près d'une cinquantaine de jeunes chercheurs en cinq ans se sont spécifiquement consacrés aux thèmes de recherche de l'Andra.

Cette mobilisation de la communauté scientifique nationale assure que la production des résultats a été conduite et discutée selon les exigences usuelles du monde académique et dans une logique d'excellence.

La dynamique scientifique ne s'est pas limitée à la mobilisation de la communauté scientifique française. L'Andra a résolument inscrit son action dans un cadre international, développant des partenariats étroits avec les agences homologues en Europe et avec des établissements de recherche étrangers. Ainsi, le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne a régulièrement accueilli des scientifiques issus d'organismes étrangers qui ont mis en œuvre leur savoir-faire dans les travaux expérimentaux. La recherche a ainsi bénéficié des meilleures compétences au plan international.

Ainsi, après quinze ans, le programme de recherche français se place à bon niveau dans le concert international et bénéficie de la reconnaissance de ses homologues étrangers.

Un recours régulier à l'évaluation externe

Un programme de cette ampleur ne saurait être complet sans des évaluations. L'Andra a eu recours régulièrement à des experts et relecteurs extérieurs pour confronter ses programmes d'études, ses recherches et ses résultats aux meilleures pratiques internationales. En 2002-2003, une revue internationale de ses programmes a été conduite et a été très encourageante sur les travaux menés. Dans la dynamique de progrès qui anime les recherches, les recommandations de cette revue ont été intégrées dans les documents produits pour 2005.

L'Andra s'est aussi efforcée d'encourager la publication de ses résultats dans les meilleures revues scientifiques internationales, à raison d'une quarantaine d'articles par an durant ces trois dernières années. La publication est la condition d'un examen critique des résultats obtenus et constitue une garantie sur la qualité des travaux.

Le programme de recherche a donc disposé des outils nécessaires à la production de données scientifiques de qualité, l'ensemble s'étant déroulé dans un environnement empreint de rigueur et soucieux d'excellence scientifique.

2. La faisabilité de principe du stockage en formation argileuse est désormais acquise

Evaluer la faisabilité de principe du stockage consiste principalement à mettre en perspective l'ensemble des données rassemblées sur chaque thématique de recherche pour construire une vue d'ensemble du système de stockage et apprécier si ce dernier peut protéger l'homme et l'environnement des déchets radioactifs qui y seraient placés. Tous les éléments aujourd'hui rassemblés vont dans le sens d'une faisabilité de principe, pour plusieurs raisons.

· Le site de Meuse/Haute-Marne présente des conditions géologiques favorables

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.

En premier lieu, la couche présente une épaisseur importante (130 m) et n'est pas affectée par des failles sur de grands volumes. Son histoire géologique est bien connue. Depuis son dépôt, cette histoire a été fort calme, ce qui constitue un argument majeur pour établir son homogénéité et son extrême stabilité. Elle est très peu sujette aux phénomènes sismiques.

La couche contient très peu d'eau et le déplacement de cette dernière y est extrêmement lent, du fait de la très faible perméabilité de la couche. Les caractérisations physiques et chimiques montrent en outre qu'elle possède une forte capacité à retenir et à piéger la majeure partie des éléments chimiques et des radionucléides présents dans les déchets.

Elle est apte au creusement par des techniques minières et la réalisation d'ouvrages n'y induit que des perturbations modérées qui ne sont, a priori, pas susceptibles de créer des chemins d'écoulement préférentiels.

Il existe une large zone de plus de 200 km² où ces propriétés sont a priori réunies (zone dite de transposition).

Enfin, la mise en commun des données recueillies a permis de bâtir un modèle d'ensemble de la géologie du secteur, y compris les formations situées au-dessus et en dessous du Callovo-Oxfordien. *Intrinsèquement, le milieu géologique présente donc des caractéristiques favorables qui le rendent apte à accueillir un stockage.*

Des architectures ont été élaborées pour tirer parti des conditions géologiques favorables

Il ne faut pas seulement disposer d'un milieu géologique présentant des qualités, il faut pouvoir l'utiliser de manière pertinente. Les études d'ingénierie ont défini des concepts de stockage simples et robustes qui sont adaptés aux caractéristiques de la couche argileuse et tirent tout le parti possible de ses qualités.

Ces concepts incluent des choix prudents pour disposer de marges de conception. Le travail n'a pas été poussé jusqu'au stade de l'optimisation mais il a permis d'établir que les architectures proposées étaient réalistes et qu'elles pouvaient être construites et exploitées pour accueillir les déchets sans difficulté particulière. Ces architectures comportent de nombreuses dispositions favorables à la sûreté d'ensemble, tel le fractionnement qui compartimente les zones de stockage ou l'agencement global qui limite les possibilités de circulation d'eau. Un travail approfondi de conception et d'ingénierie vient ainsi en appui des propriétés naturelles favorables du milieu et aide à en tirer le parti le plus efficace. En outre, les études relatives à la sûreté opérationnelle et à la sécurité, menées sur la base du retour d'expérience d'autres installations minières ou nucléaires, démontrent la possibilité d'une exploitation sûre et sans impact sur l'environnement.

· La réversibilité a été placée au cœur de la démarche d'étude et traduite concrètement

Les architectures élaborées pour le stockage ont été sélectionnées en fonction de leur aptitude à permettre la réversibilité. L'exigence de réversibilité renvoie à une approche prudente de la gestion des déchets en univers incertain. Elle s'apparente au principe de précaution. Elle répond également à une légitime exigence de modestie pour le scientifique. Lorsqu'il s'agit de prévoir des évolutions sur des durées très longues, de maîtriser des phénomènes complexes, le retour en arrière doit être possible.

L'Andra a développé une approche concrète du stockage réversible qui dépasse la seule possibilité technolo-

gique de retirer les colis. Elle peut être définie comme la possibilité d'un pilotage progressif et flexible du stockage par étapes. L'objectif est de laisser aux générations futures une liberté de décision pour la gestion des déchets. Aussi, l'Andra a retenu de ne pas fixer a priori de durée à la réversibilité. Il s'agit d'offrir une souplesse aussi grande que possible dans la gestion de chaque étape, en ménageant la possibilité d'un maintien en l'état avant de décider de passer à l'étape suivante ou de revenir en arrière. La conception du stockage (architecture modulaire, simplification de l'exploitation, dimensionnement et choix de matériaux durables, etc.) vise à laisser les choix les plus ouverts possibles.

Le stockage réversible peut ainsi jouer un double rôle. Il peut être géré comme un entreposage avec la mise en place des déchets et, si cela est souhaité, la reprise de ces derniers par une simple inversion du processus de stockage. Le maintien de cette réversibilité suppose évidemment l'intervention de l'homme, sans toutefois induire de contraintes excessives. Mais, point essentiel qui le démarque d'un simple entreposage, *il inclut la possibilité d'être progressivement fermé afin de pouvoir ensuite évoluer de manière sûre et passive sans aucune intervention humaine*.

Les études ont montré que *pour une durée de deux à trois siècles, une installation de stockage était réversible, sans autre intervention que des opérations classiques* de maintenance et de surveillance. Au-delà de cette période, il serait nécessaire de procéder à des interventions plus lourdes qui demeurent techniquement possibles.

Le milieu géologique argileux et les concepts développés par l'Andra permettent de répondre à l'exigence de réversibilité et de faire de celle-ci un outil de flexibilité dans la gestion des déchets radioactifs. La réversibilité autorise également l'acquisition progressive de la confiance en la démonstration de sûreté du stockage, en laissant toujours ouverte la possibilité, à terme, d'une évolution indépendante de l'intervention humaine.

· Un regard d'ensemble de la sûreté qui montre l'absence d'impact significatif sur l'environnement

Dans le cas où il serait choisi de fermer le stockage, une évaluation détaillée a été conduite de son comportement dans le temps et de son impact éventuel sur l'homme et l'environnement.

En se fondant sur les données scientifiques acquises et les architectures de stockage proposées, une analyse de l'évolution du stockage après sa fermeture a été conduite.

Elle a consisté à passer en revue tous les phénomènes qui se dérouleront dans le stockage, à examiner leurs interactions, à modéliser les effets des perturbations possibles pour, *in fine*, en déduire le comportement des déchets et apprécier les mécanismes pouvant conduire à un relâchement de la radioactivité. *Un des acquis majeurs des recherches est d'avoir bâti une histoire du stockage sur les prochaines centaines de milliers d'années qui permet de disposer ainsi d'une compréhension de l'évolution du système*, des paramètres clés, des risques et des incertitudes correspondantes.

Partant de cette vision détaillée du stockage et de ses composantes, les études de sûreté se sont attachées à donner une représentation simplifiée et prudente pour en évaluer les performances.

L'évolution du stockage en situation normale a été représentée et modélisée au moyen d'outils de calculs intégrant les avancées récentes de la simulation numérique (plateforme ALLIANCES). L'objectif était d'examiner l'efficacité des fonctions de sûreté imparties au stockage. En effet, ces fonctions traduisent les attentes envers un dispositif de stockage, attentes qui fondent elles-mêmes l'intérêt de ce système technique. Au moyen de divers indicateurs, l'analyse a montré que les trois fonctions de sûreté (« s'opposer à la circulation d'eau », « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser », « retarder et atténuer la migration ») étaient remplies par le dispositif proposé. Les choix prudents, voire pessimistes, effectués permettent de disposer de marges de sûreté importantes. Ainsi, toutes les évaluations effectuées présentent un degré de robustesse important.

L'analyse a montré que ces conclusions valaient non seulement en situation normale, représentative des évolutions les plus probables, mais aussi dans des configurations altérées nettement plus pénalisantes : une défaillance des composants du stockage ou une intrusion par forage dans le stockage n'empêcheraient pas ce dernier de remplir ses fonctions, en protégeant efficacement l'homme et l'environnement des déchets radioactifs qui y seraient stockés. Au global, l'analyse de la performance du système de stockage montre que la sûreté ne repose pas sur un élément unique, mais s'appuie sur une défense en profondeur qui fait intervenir des composants multiples et redondants. La présence de plusieurs éléments, qui peuvent prendre le relais l'un de l'autre en cas de défaillance, constitue ainsi une valeur ajoutée forte de la conception actuelle du stockage et assure la robustesse du système de stockage.

Au terme des calculs effectués dans le cadre du modèle de sûreté en évolution normale, les performances du stockage répondent, avec des marges importantes, aux objectifs de dose recommandés par la règle fondamentale de sûreté RFS III.2.f. Les impacts engendrés par les déchets de haute activité vitrifiés (déchets C) et de moyenne activité à vie longue (déchets B) se situent plusieurs ordres de grandeur au-dessous de la norme de référence fixée à un quart de la dose admissible pour le public (soit 0,25 mSv par an).

Une situation de dégradation profonde des propriétés de tous les composants du stockage, milieu géologique inclus, a été étudiée : elle conduit également à un impact compatible avec les références en termes de dose.

En conclusion, la démarche de sûreté vient étayer l'étude de faisabilité du stockage. Au vu des connaissances actuelles et en retenant des hypothèses prudentes, les conséquences pour l'homme et l'environnement que pourrait entraîner un éventuel stockage apparaissent conformes aux normes et recommandations en vigueur. Cette conclusion est obtenue avec des marges de sûreté importantes.

3. Une recherche qui pourrait se poursuivre dans une perspective de qualification de site et de développement technologique

Le programme de recherche mené sur les quinze années écoulées a réuni les éléments qui permettent de répondre à la question sur la faisabilité de principe. On peut considérer avec une confiance raisonnable que cette dernière est acquise. Il ne s'agit que d'une faisabilité de principe et des incertitudes demeurent. Il ne saurait être question, au stade actuel d'une démarche industrielle ou de la constitution d'un dossier de sûreté qui serait indispensable pour solliciter formellement une autorisation de construction.

Sans préjuger des décisions que la représentation nationale jugera opportun de prendre, quelques éléments sont nécessaires pour éclairer le stade actuel des études et situer les perspectives qu'elles pourraient ouvrir, le cas échéant.

Quatre éléments doivent être pris en compte :

- bien que l'essentiel des paramètres nécessaires à l'évaluation de sûreté ait été acquis en liaison avec le laboratoire souterrain, les expériences ont été conduites sur des durées brèves. Sans remettre en cause les conclusions précédentes, une légitime prudence implique de disposer de séries de données sur des durées plus longues et donc de laisser les dispositifs expérimentaux poursuivre l'acquisition de connaissances au cours des prochaines années. Ce travail effectué en parallèle d'autres développements viendra conforter la démarche d'ensemble,
- les architectures de stockage ont été évaluées à partir d'études de principe et du retour d'expérience d'autres installations. Il n'a pas été procédé, à ce stade, à des essais technologiques d'ouvrages de stockage en vraie grandeur. Ceux-ci apparaissaient en effet prématurés pour établir une faisabilité de principe. Pour aller au-delà, il serait utile de réaliser des démonstrateurs d'alvéoles *in situ* et d'expérimenter concrètement les possibilités de mise en œuvre des solutions étudiées en milieu souterrain. Un travail de consolidation et d'optimisation de l'ingénierie serait en outre utile si l'on souhaite s'orienter vers une finalité industrielle,
- les recherches ont visé à caractériser principalement la zone de proximité immédiate du laboratoire souterrain. Des travaux à plus large maille ont été menés sur une zone « de transposition » de 200 km². Toutefois, la caractérisation fine et détaillée de cette zone n'a pas été réalisée. Cela signifie en particulier que la question de la localisation d'un éventuel stockage au sein de cette zone ne peut être tranchée aujourd'hui et appelle des travaux complémentaires de qualification,
- enfin, certains éléments du système de stockage sont aujourd'hui représentés au moyen de modèles simplifiés et pessimistes. Cela apporte évidemment des marges de sûreté puisque l'on a négligé des effets favorables à la sûreté du stockage. En revanche, dans le cadre d'une démarche plus finalisée, il serait intéressant de quantifier ces marges et de réduire parallèlement les incertitudes résiduelles. On serait ainsi

en situation d'appréhender de manière encore plus précise le degré de confiance qui peut être accordé aux évaluations de sûreté.

Ces différents éléments éclairent les principales orientations de ce que pourrait être le programme de travail au-delà de 2006, si les évaluations concluaient à la pertinence des conclusions de l'Andra et si la représentation nationale souhaitait la poursuite des travaux sur le stockage en formation géologique.

Pour la période au delà de 2006, avec toutes les réserves déjà rappelées, l'Andra s'est essayée à bâtir un schéma de développement, visant la production d'un rapport de sûreté à l'horizon d'une dizaine d'années.

Dans un premier temps, on passerait de la phase actuelle de faisabilité de principe à une phase de développement, d'optimisation et d'études détaillées. Cette phase pourrait s'étendre sur une période d'environ cinq années. Elle permettrait d'abord de répondre aux éventuelles questions soulevées par les évaluateurs en 2006 et de se focaliser de manière accrue sur les aspects technologiques et de mise en œuvre industrielle, tout en recherchant une optimisation de la conception proposée aujourd'hui. Cela permettrait un passage progressif d'une donnée scientifique à une donnée industrielle :

- il s'agirait d'abord de réunir les éléments nécessaires à la localisation d'une éventuelle installation stockage.
 Dans cet esprit, la zone de transposition devrait être mieux circonscrite sur la base d'éléments complémentaires de ceux utilisés jusqu'alors, puis une zone pouvant correspondre à l'emprise d'un éventuel stockage pourrait être caractérisée plus en détail afin de la qualifier. Cette reconnaissance en grand passerait notamment par une campagne sismique de grande ampleur tirant parti des acquis antérieurs sur les méthodes d'analyse et leur représentativité,
- d'un point de vue scientifique, les recherches relèveraient essentiellement de deux grandes problématiques : les changements d'échelle (confirmer la validité détaillée des données acquises sur des intervalles de temps et d'espace limités) et la validation de la compréhension des phénomènes et de leurs interactions (en grand et in situ) en évaluant précisément les marges de sûreté. D'un point de vue technologique, les thématiques abordées concerneraient l'étude de la réalisation d'infrastructures de stockage ainsi que les opérations de manutention ou de surveillance. Dans ce cadre, le laboratoire de Meuse/Haute-Marne est un outil pour poursuivre l'acquisition de données et conduire, directement dans le milieu, des essais à caractère technologique. La réalisation de ces essais viserait deux objectifs : d'une part, tester en situation réelle les procédés de construction des ouvrages, les techniques et outils correspondants, d'autre part, valider à échelle réelle (c'est-à-dire sur un ouvrage représentatif) les connaissances scientifiques acquises sur des échantillons ou à des échelles intermédiaires (par exemple avec les expérimentations en galeries pour la géomécanique). Ces essais parachèveraient la démarche progressive de changement d'échelle, en lien avec les itérations de conception.

Cette phase de développement, d'optimisation et d'études détaillées pourrait se conclure par un examen technique d'ensemble, jalon intermédiaire avant un éventuel passage à une phase de développement ultérieur.

Au-delà de cette phase, il serait possible, dans l'hypothèse où les différents résultats scientifiques et techniques feraient l'objet d'une évaluation favorable, de passer à un stade de développement industriel. Afin de donner quelques ordres de grandeur, on peut penser que le déroulement d'une telle démarche serait susceptible de déboucher sur une installation industrielle à l'horizon 2025.

Ainsi, une réflexion a été menée pour préciser les étapes qui seraient envisageables pour la poursuite des recherches au-delà de 2006, si telle était la conclusion de la représentation nationale. Elle offre un premier schéma de développement à même de tirer parti des acquis importants de la période 1991-2005.

Glossaire

Actinides : éléments naturels ou artificiels dont le noyau compte un nombre de protons supérieur ou égal à 89. Quatre actinides existent à l'état naturel : actinium, thorium, protactinium, uranium. Les actinides mineurs (principalement américium, curium, neptunium) sont formés dans un réacteur par captures successives de neutrons à partir des noyaux du combustible. Leur radioactivité et leur puissance thermique décroissent lentement. Après la décroissance des produits de fission à période moyenne, les déchets présentent un dégagement thermique résiduel qui résulte de l'activité α de l'américium 241, qui, à son tour, décroît progressivement.

Analogues naturels et archéologiques : on regroupe sous cette appellation des objets géologiques ou manufacturés ayant subi des phénomènes comparables à ceux qui se produiraient dans un stockage et sur des durées similaires. Par exemple :

- les gisements d'uranium, comme celui d'Oklo (Gabon) qui présente la particularité d'avoir connu des réactions nucléaires pendant son histoire (et renferme de ce fait de nombreux radionucléides contenus dans les déchets) et sur lequel ont été étudiés les mécanismes de confinement et de migration des radionucléides,
- les formations de marnes bitumineuses qui ont produit des ciments naturels par combustion, telles les formations de Jordanie sur lesquelles ont été étudiés les mécanismes de perturbations alcalines,
- les verres basaltiques (obsidienne) produits par des phénomènes volcaniques ou des objets en verre fabriqués par l'homme (notamment vitraux du Moyen Age) sur lesquels ont été étudiés les phénomènes de dissolution de la silice,
- des objets en fer (armes, boucliers, clous...) datant du début de la métallurgie en Europe, entre 500 et 300 ans avant Jésus-Christ, retrouvés enterrés, sur lesquels ont été étudiés les mécanismes de corrosion.

Analyse de sensibilité : les valeurs retenues pour les calculs de sûreté, qui peuvent être « phénoménologiques » (valeurs considérées comme les plus probables et traduisant au mieux les données acquises) ou « pénalisantes », sont testées par des analyses de sensibilité. Celles-ci évaluent les variations d'impact si l'on remplace, par exemple, une valeur phénoménologique par une valeur pénalisante.

Ancrage : le creusement des ouvrages de stockage peut créer, à leur voisinage dans la formation-hôte, des fractures. Lors de la fermeture des alvéoles B ou des galeries par des scellements en argile gonflante, on interrompt la zone fracturée au moyen d'une coupure hydraulique ou ancrage (saignée remplie de briquettes d'argile gonflante).

Anisotrope : l'état de contrainte est dit anisotrope lorsque les contraintes ont des intensités différentes selon les directions.

Argilite : type de roche argileuse indurée par compaction. Elle peut contenir des minéraux autres que les minéraux argileux (quartz et carbonates) en forte proportion (environ 50 %).

Bentonite ou argile gonflante : matériau de très faible perméabilité qui gonfle au fur et à mesure qu'il s'hydrate.

Biosphère : ensemble des écosystèmes, comprenant tous les êtres vivants et le milieu où ils vivent.

Champ de température : distribution spatiale des températures.

Contrainte géomécanique principale majeure : pression maximale s'exerçant à l'horizontale sur les terrains et ayant pour origine l'orientation des mouvements des plaques tectoniques. La contrainte principale mineure est la contrainte qui s'exerce dans une direction perpendiculaire à la contrainte géomécanique principale majeure.

Convection/diffusion : les éléments introduits dans le stockage (constituants des colis de déchets, matériaux de construction...) peuvent à terme se dissoudre dans l'eau. La dissolution est très lente, elle est régie par des équilibres chimiques et dépend du flux d'eau qui percole dans le stockage. Une fois un élément dissous dans l'eau, il peut se déplacer :

- par diffusion : sous l'effet de l'agitation brownienne de la matière, l'élément dissous va migrer des zones où il se trouve en plus grande concentration dans l'eau (à proximité des déchets, pour les radionucléides) vers les zones où sa concentration est plus faible ; ce phénomène est particulièrement lent,

- ou par convection, c'est-à-dire entraîné par l'eau si celle-ci circule.

Selon la vitesse de circulation de l'eau, le déplacement par convection peut être plus rapide que par diffusion,

ou plus lent donc négligeable (on dit alors que le mode de transport prédominant est la diffusion). C'est la seconde situation qui est recherchée dans le stockage et qui est rendue possible par la faible perméabilité des argilites du Callovo-Oxfordien et par les scellements fermant puits et galeries.

Criticité : L'accident de criticité (déclenchement incontrôlé d'une réaction de fission en chaîne au sein de matières fissiles comme l'uranium 235 ou le plutonium) ne peut survenir qu'en présence d'une quantité suffisante de matières fissiles, supérieure à « une masse critique » (par exemple 60 kg d'uranium enrichi à 3,5% en uranium 235, ou 510 g de plutonium), et d'un milieu favorable, comme l'eau. Il entraîne une émission de rayonnements gamma et neutroniques ainsi qu'un dégagement de gaz de fission radioactifs (isotopes de l'iode, du krypton, du néon...). Une configuration sous-critique consiste à s'assurer que la géométrie et la masse de matières fissiles ainsi que la nature du milieu où se trouvent ces matières ne permettent pas l'amorce d'un tel phénomène.

Cuesta : le bassin de Paris est constitué d'un empilement de couches argileuses et calcaires, qui s'est légèrement affaissé au centre. L'érosion a ensuite dégagé les couches calcaires plus dures qui, en bordure, forment un relief dissymétrique (en pente douce vers le centre du bassin et abrupte vers l'extérieur), appelé cuesta ou côte.

Décharge hydraulique : chute des pressions d'eau.

Désaturation : diminution du taux d'humidité de la roche. Tout ou partie de la porosité de la roche n'est alors pas totalement remplie d'eau liquide.

Diagenèse : ensemble des processus qui ont affecté les sédiments meubles à partir de leur dépôt et ont conduit à leur transformation en roche. Ceci a commencé par l'expulsion de l'eau contenue dans les sédiments, associée à des dissolutions de minéraux. Il en a résulté des recristallisations et une diminution de leur porosité, des modifications de composition chimique des minéraux et de la texture des sédiments. Par suite de l'évolution géologique, l'enfouissement progressif des sédiments a entraîné une augmentation de la pression et de la température. Les contraintes tectoniques ainsi que les circulations ultérieures de fluides ont pu induire de nouvelles recristallisations qui sont très limitées dans le Callovo-Oxfordien.

Diagraphie : mesure en continu d'une propriété physique (résistivité électrique, vitesse du son, porosité, densité...) tout au long d'un forage au moyen d'un capteur déplacé dans ce forage.

Diffusion : voir convection/diffusion.

Dispersion : phénomène résultant principalement des différences de vitesses de migration à l'échelle microscopique et tendant à homogénéiser les concentrations en solutés.

Dose : la dose équivalente (ou dose tout court par abus de langage) représente la quantité d'énergie reçue par les différents organes et tissus d'un individu exposé à un rayonnement ionisant pondérée par un facteur propre à chaque tissu ou organe selon sa sensibilité au rayonnement. Elle s'exprime en sievert. A titre d'illustration la dose annuelle reçue par un individu du fait de la radioactivité naturelle est d'environ 2,5 millisieverts par an.

Ecoulement biphasique : écoulement simultané d'une phase liquide et d'une phase gazeuse.

Etat initial (ou état 0) : mesure des paramètres initiaux d'un site susceptibles d'être modifiés au cours de travaux, de façon à pouvoir suivre leur évolution par des mesures régulières.

Exutoire : zone de transfert d'eau entre le milieu géologique et la biosphère.

Exothermique : qui dégage de la chaleur.

Forages déviés : forages dont la trajectoire n'est pas verticale, mais pilotée depuis la surface pour traverser des objets géologiques déjà repérés ou suivre une formation (la couche d'argilite) selon la direction horizontale.

Géophysique sismique : procédé couramment utilisé en prospection géologique pour obtenir une image du sous-sol et des couches qui le composent. Une onde acoustique émise depuis la surface par des camions vibrateurs se propage à des vitesses différentes selon la nature des terrains. La limite entre deux roches différentes constitue un réflecteur qui renvoie une partie du signal acoustique vers la surface, à des enregistreurs (« géophones »). Le temps d'aller-retour de l'onde sonore entre l'émetteur et le récepteur permet de calculer la profondeur à laquelle se trouve le réflecteur, donc la distance de chaque couche par rapport à la surface.

Gradient hydraulique : différence de charge hydraulique entre deux points rapportée à la distance qui les sépare. Il s'exprime en mètre par mètre (m/m).

Gradient thermique : différence de températures entre deux points rapportée à la distance qui les sépare. Il s'exprime en degré par mètre (°C/m).

Intercalaires : colis inertes (ils ne contiennent pas de déchets) qui sont « intercalés » entre les colis de déchets stockés dans une alvéole. Ils permettent d'espacer ces derniers et de diminuer le flux de chaleur vers la roche.

Modèles conceptuels : ils visent à donner la représentation de l'état du milieu géologique ou du comportement d'un ou plusieurs composants du stockage au cours de leur évolution. Ils décrivent les processus thermiques, hydrauliques, mécaniques et chimiques en vue des analyses de sûreté et des simulations numériques associées.

MPa: mégapascal. 1 MPa représente la pression exercée par un poids de 10 kg sur une surface de 1 cm².

Paléosurface : ancienne surface topographique à un moment donné de l'histoire géologique d'une région. On en retrouve des traces grâce aux marques laissées par les phénomènes d'échange entre le sol et l'atmosphère (sols durcis, concrétions dues à l'évaporation....).

Pergélisol : tranche de terrain gelé en permanence sous un climat froid.

Perturbation alcaline : ensemble des transformations affectant les solides et les fluides induites par la progression d'une eau alcaline issue d'un béton.

Perturbation oxydante : ensemble des transformations affectant les solides et les fluides induites par l'oxygène de l'air apporté par la ventilation.

Pression d'entrée de gaz : pression nécessaire pour qu'un gaz puisse vaincre les forces capillaires s'exerçant sur l'eau dans les pores de petits diamètres. Le gaz pourra déplacer l'eau dans les pores si sa pression est au moins égale à la somme de cette pression d'entrée et de la pression de l'eau.

Produits d'activation : ils sont formés par capture de neutrons dans les matériaux du combustible. Leur radioactivité est sensiblement inférieure à celle des produits de fission et actinides mineurs, mais doit être prise en compte car certains de ces radionucléides ont une longue période radioactive.

Produits de fission : ils sont issus directement de la fission des atomes d'uranium et de plutonium : césium, strontium, iode, technétium..., ou de la désintégration des fragments de fission. Le césium 137 (et son descendant le barium 137) et le strontium 90 (et son descendant l'yttrium 90) sont à l'origine de l'essentiel du rayonnement et du dégagement thermique des déchets HAVL, importants au cours des 300 premières années compte tenu de leur période de 30 ans.

Profil sismique : image en 2D, élaborée à partir des mesures enregistrées par les géophones (voir géophysique sismique), qui reconstitue les limites entre les différentes couches de roches.

Radiolyse : transformation de la matière organique ou de l'eau sous l'effet des rayonnements.

Radionucléide : isotope radioactif d'un élément. Seul un petit nombre de radionucléides existent naturellement : quelques éléments lourds (thorium, uranium, radium...) et quelques éléments légers (carbone 14, potassium 40). Les autres, dont le nombre dépasse 1 500, sont créés en laboratoire pour des applications médicales ou dans les réacteurs nucléaires sous forme de produits de fission ou d'actinides mineurs.

Rejeu : mouvement affectant à nouveau une faille du fait d'une activité tectonique postérieure à sa création.

Surrection : soulèvement lent de l'écorce terrestre.

Traceurs : éléments chimiques ou molécules que l'on peut dissoudre dans l'eau pour suivre le trajet d'écoulements souterrains, mesurer la vitesse de déplacement et/ou la dispersion possible d'éléments en solution. Certains sont mis en œuvre dans des expérimentations de traçage ; les éléments et molécules sont alors choisis pour leur facilité de détection, par exemple fluorescence (fluorescéine), couleur (rhodamine), conductivité électrique (sel), radioactivité disparaissant rapidement (iode 134). Certains radionucléides sont présents naturellement dans le milieu géologique (par exemple le carbone 14). La mesure de leur concentration en différents endroits permet alors de savoir depuis combien de temps ils s'y trouvent et à quelle vitesse ils se déplacent. On parle alors de traceurs naturels, ceux-ci permettent d'avoir accès à des échelles de temps de quelques milliers à centaines de milliers d'années.

Soluté : élément en solution dans l'eau, d'origine naturelle ou issu du stockage (élément de dégradation des matériaux, trace de radionucléide, toxique chimique...).



ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile

ANDRA>Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Notes



ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile

ANDRA>Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Notes



ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile

ANDRA>Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile Notes



ANDRA > Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile

Crédit Photos :

Studio Durey - Germain Photos - OECD - Les Films Roger Leenhardt AREVA - CEA - Philippe Demail - Thierry Duvivier