



## Document interne

Identification  
C.NT.AHVL.09.0109

Nom du FDR : HAVL Argile

Arborescence :

07/14/09 - 11:00:00 AM

Émetteur	Repère support/secrétaire	Date d'origine	Page
DP	M:\Metiers\Havl-Argile\Programmes_associes_au_PDD\Reversibilite\	Août 2009	1/25

### Réponses de l'Andra aux questions posées par la Commission « réversibilité » du Comité local d'information et de suivi

Documents associés :

CE DOCUMENT EST LA PROPRIÉTÉ DE L'ANDRA ET NE PEUT ÊTRE REPRODUIT OU COMMUNIQUÉ SANS SON AUTORISATION

Ind.	Date	Nom/visa du rédacteur	Nom/visa vérificateur	Nom/visa approbateur
A	21-09-09	Collectif	T. LABALETTE	PL. FORBES



**Identification**  
C.NT.AHVL.09.0109

**Page** 2/25  
**Rév.** A

ANDRA.001.F - page 2/2

## Révisions

Ind.	Date	Modifications
A	Cf. 1 <sup>ère</sup> page	Emission initiale

## Sommaire

<b>1. Objet</b>	<b>4</b>
<b>2. Quel est le volume de déchets, selon leur nature, potentiellement destinés au stockage géologique profond ?</b>	<b>5</b>
<b>3. Le stockage est-il conçu pour être irréversible à terme, avec une période d'au moins 100 ans au cours de laquelle la récupérabilité sera possible ? (et si oui, quand démarre cette période de 100 ans ?)</b>	<b>6</b>
<b>4. Ou bien les perspectives de transmutation permettant d'envisager un nouveau mode de gestion sont-elles prises en compte ? (quid des déchets déjà utilisés)</b>	<b>7</b>
<b>5. Dans combien de temps le resserrement des galeries aura-t-il un impact sur les colis ? Les galeries seront-elles remblayées, et si oui, avec quels effets sur l'évolution des galeries et des colis ?</b>	<b>8</b>
<b>6. Les modes de conditionnement selon les matériaux : quelle durée de vie ? Quelle résistance à l'écrasement ? Quelles seraient les conséquences de la détérioration d'un colis due à l'écrasement ?</b>	<b>9</b>
<b>7. Un refroidissement des colis est-il prévu dans les alvéoles ? Si oui, de quel type et avec quelles conséquences ?</b>	<b>11</b>
<b>8. Où en sont les recherches sur le système de surveillance ?</b>	<b>12</b>
<b>9. Les recherches actuelles visent-elles à permettre une mémoire post-fermeture aussi longue que possible, ou privilégient-elles l'oubli comme moyen de sécurisation du site ?</b>	<b>14</b>
<i>Annexe 1 : Détails sur les déchets potentiellement destinés au stockage géologique profond</i>	<b>15</b>
<i>Annexe 2 : Compléments techniques à la réponse sur la période de récupérabilité</i>	<b>19</b>
<i>Annexe 3 : Compléments techniques sur les perspectives de transmutation</i>	<b>22</b>
<i>Annexe 4 : Caractéristiques générales et architecture d'un système de surveillance</i>	<b>23</b>
<i>Annexe 5 : La surveillance de l'environnement</i>	<b>25</b>

# 1. Objet

Par courrier du 9 juillet 2009, la Commission « réversibilité » du CLIS a transmis à l'Andra les questions ci-après. Cette note regroupe les réponses préparées par l'Andra.

## COMMISSION « REVERSIBILITE »

- Quel est le volume des déchets, selon leur nature, potentiellement destinés au stockage géologique profond ?
- Le stockage est-il conçu pour être irréversible à terme, avec une période d'au moins 100 ans au cours de laquelle la récupérabilité sera possible ? (et si oui, quand démarre cette période de 100 ans ?)
- Ou bien les perspectives de transmutation permettant d'envisager un nouveau mode de gestion sont-elles prises en compte ? (quid des déchets déjà utilisés)
- Dans combien de temps le resserrement des galeries aura-t-il un impact sur les colis ? Les galeries seront-elles remblayées, et si oui, avec quels effets sur l'évolution des galeries et des colis ?
- Les modes de conditionnement selon les matériaux : quelle durée de vie ? Quelle résistance à l'écrasement ? Quelles seraient les conséquences de la détérioration d'un colis due à l'écrasement ?
- Un refroidissement des colis est-il prévu dans les alvéoles ? Si oui, de quel type et avec quelles conséquences ?
- Où en sont les recherches sur le système de surveillance ?
- Les recherches actuelles visent-elles à permettre une mémoire post-fermeture aussi longue que possible, ou privilégient-elles l'oubli comme moyen de sécurisation du site ?

## 2. Quel est le volume de déchets, selon leur nature, potentiellement destinés au stockage géologique profond ?

L'inventaire de dimensionnement du projet de centre de stockage a été mis à jour en 2009. Il comprend des marges supplémentaires pour gérer les incertitudes actuelles sur les quantités de colis à produire à l'avenir. Il prévoit ainsi :

- environ 12 000 m<sup>3</sup> de « colis primaires<sup>1</sup> » de déchets de haute activité (HA), répartis en :
  - déchets vitrifiés « C0 » (caractérisés par un dégagement thermique modéré) ;
  - déchets vitrifiés hors C0 (présentant un dégagement thermique plus élevé) ;
  - déchets « CU3 » (combustibles usés non traités de la recherche et la défense) ;
- environ 108 000 m<sup>3</sup> de colis primaires de déchets de moyenne activité à vie longue (MAVL), dont :
  - des déchets de structure et des déchets technologiques conditionnés en conteneurs standards de déchets compactés (CSD-C) ;
  - des effluents bitumés ;
  - des déchets activés et des déchets technologiques conditionnés en conteneurs béton ;
  - des déchets de déconstruction.

Une réponse plus détaillée est donnée en annexe 1.

---

<sup>1</sup> Les colis primaires sont la forme sous laquelle les producteurs (Areva, CEA, EDF) conditionnent leurs déchets et les entreposent sur leurs sites (La Hague [Manche], Marcoule [Gard] et Cadarache [Bouches-du-Rhône] principalement).

### **3. Le stockage est-il conçu pour être irréversible à terme, avec une période d'au moins 100 ans au cours de laquelle la récupérabilité sera possible ? (et si oui, quand démarre cette période de 100 ans ?)**

Le stockage doit pouvoir être fermé à terme, si le choix en est fait, afin de ne pas en laisser la charge aux générations futures tout en pérennisant la protection de l'homme et de l'environnement vis-à-vis des déchets radioactifs. En application de la loi du 28 juin 2006, cette fermeture ne pourrait être décidée que par le Parlement. En tout état de cause, elle n'interviendrait pas avant un siècle environ (à partir du début de l'exploitation), durée nécessaire à la mise en stockage des volumes de colis de déchets indiqués plus haut. La fermeture du stockage ne rend pas les déchets irrécupérables.

Le stockage est conçu pour faciliter la récupération des colis de déchets pendant au moins cent ans après leur mise en stockage. Des compléments techniques sont présentés en annexe 2. La demande de réversibilité concerne tous les colis ; elle s'applique dès le premier colis stocké.

L'Andra travaille sur une approche progressive où la « durée de réversibilité » ne serait pas figée a priori, tout en assurant les cent années au moins prévues par la loi. Il serait en effet possible de réévaluer régulièrement cette durée grâce à l'observation du stockage. De même qu'un exploitant nucléaire doit remettre tous les dix ans un rapport de sûreté sur son installation, on pourrait imaginer que l'exploitant du stockage fournisse périodiquement un rapport sur les modalités de réversibilité. Cela donnerait davantage de liberté de choix aux générations suivantes.

#### **4. Ou bien les perspectives de transmutation permettant d'envisager un nouveau mode de gestion sont-elles prises en compte ? (quid des déchets déjà utilisés)**

Faciliter la récupération des colis pendant au moins cent ans ouvre la possibilité de mettre en œuvre d'autres modes de gestion. La durée minimale de cent ans fixée par la loi pour la réversibilité est une échelle de temps significative vis-à-vis du progrès technique.

Sans préjuger de progrès scientifiques et techniques à terme, les recherches en cours ne permettront pas de transmuter les déchets de l'inventaire de dimensionnement du stockage (voir la question relative aux volumes de déchets). Les perspectives actuelles de transmutation concernent le parc de réacteurs électronucléaires qui pourrait succéder au parc EDF actuel ainsi que l'usine de traitement des combustibles usés qui remplacerait alors l'usine actuelle de La Hague<sup>2</sup>.

Des compléments techniques sont donnés en annexe 3.

---

<sup>2</sup> Le modèle d'inventaire de dimensionnement du projet de centre de stockage ne couvre pas les futures générations de réacteurs et d'usines.

## 5. Dans combien de temps le resserrement des galeries aura-t-il un impact sur les colis ? Les galeries seront-elles remblayées, et si oui, avec quels effets sur l'évolution des galeries et des colis ?

Pour tous les types de déchets, les dispositions techniques étudiées par l'Andra (voir l'annexe 2) conduisent à ce qu'il n'y ait pas de coincement des colis dans leurs alvéoles avant :

- au minimum 100 ans après la mise en place des déchets MAVL, sans tenir compte des marges de sécurité adoptées dans les dimensionnements ; la durée de convergence des alvéoles sur les colis MAVL pourra dépendre du dimensionnement retenu pour le revêtement en béton de ces alvéoles.
- plusieurs siècles après la mise en place des déchets HA (pendant la période dite « thermique »<sup>3</sup>).

Les solutions techniques proposées ne nécessitent pas de fermer les alvéoles et de remblayer les galeries au fur et à mesure de la mise en place des colis de déchets. Cependant, s'il est décidé de fermer le stockage, ou une partie du stockage, les galeries d'accès seront alors remblayées et scellées pour pérenniser la sûreté. La conception actuelle du stockage ouvre la possibilité d'une fermeture par étapes des installations souterraines.

Le remblayage aura pour effet de supprimer la ventilation des galeries, arrêtant les phénomènes d'assèchement et d'oxydation de l'argilite autour des ouvrages. De l'eau provenant des argilites plus lointaines resaturera progressivement les matériaux des galeries (argilites, béton, remblais). La lente altération des bétons s'accompagnera de déformations des galeries, limitées par la présence des matériaux de remblayage. Ces derniers ainsi que les scellements aménagés dans les galeries évitent de créer à long terme des chemins préférentiels de circulation d'eau dans le stockage.

Dans les alvéoles MAVL, l'arrêt de la ventilation met un terme à l'assèchement du béton constitutif des conteneurs, son humidité augmentera très progressivement. Ce mécanisme sera très lent (à l'échelle de milliers d'années).

Le remblayage des galeries d'accès aux alvéoles HA n'a pas d'influence notable sur l'évolution de ces alvéoles et des colis.

---

<sup>3</sup> Cf. réponse à la question sur les modes de conditionnement.



## 6. Les modes de conditionnement selon les matériaux : quelle durée de vie ? Quelle résistance à l'écrasement ? Quelles seraient les conséquences de la détérioration d'un colis due à l'écrasement ?

### ➤ Déchets de haute activité (HA)

Les déchets HA sont en général vitrifiés (hormis certains combustibles usés, non traités). Le verre présente une grande résistance chimique à l'eau, il peut ainsi maintenir un confinement des déchets au sein des colis sur une durée très longue, de plusieurs centaines de milliers d'années. Les déchets vitrifiés sont coulés dans un conteneur en acier inoxydable, lui-même placé dans un conteneur épais en acier non allié à faible teneur en carbone (Figure 1). Les combustibles usés non traités sont placés dans un conteneur de stockage en acier similaire aux déchets vitrifiés.

La conception actuelle des conteneurs de stockage HA leur confère une durée de vie de plusieurs siècles au moins en situation de stockage.

Compte tenu du dimensionnement actuel du conteneur de stockage des déchets HA, celui-ci présente une résistance mécanique supérieure au poids des terres (12 MPa). Cette résistance diminuera sur le long terme avec la corrosion progressive de l'acier. En tout état de cause, elle restera supérieure à la charge appliquée pendant plusieurs siècles (chargement hydrostatique de l'ordre de 5 MPa).

Une détérioration du conteneur de stockage des déchets HA n'a pas de conséquence sur la sûreté dès lors que la rupture intervient au-delà de la période thermique du stockage<sup>4</sup>. C'est pourquoi ce conteneur doit avoir une durée de vie supérieure à la période thermique.

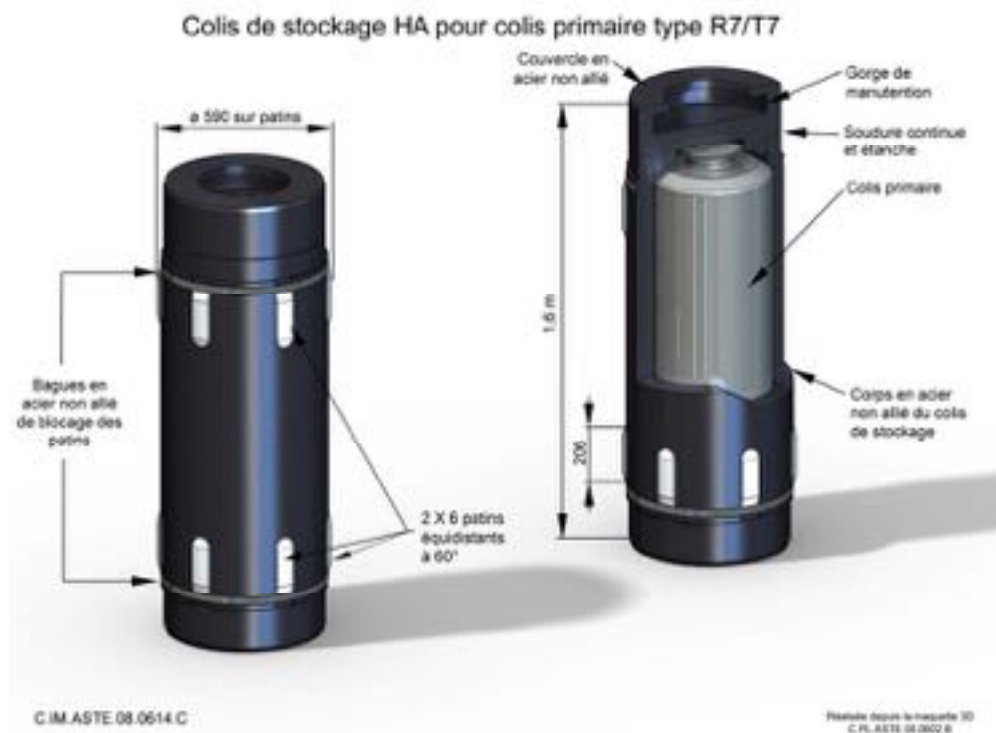


Figure 1 Exemple de conteneur de stockage étudié pour des déchets HA

<sup>4</sup> La période thermique du stockage est la durée pendant laquelle la température dans les colis vitrifiés les plus chauds reste supérieure à 50°C environ. Elle est de plusieurs siècles pour les déchets HA fortement exothermiques produits par Areva à la Hague. Au-delà, la température passe sous le seuil de 50°C du fait de la décroissance radioactive des déchets.

➤ Déchets de moyenne activité à vie longue (MAVL)

Les colis primaires de déchets MAVL sont constitués de matériaux divers (aciers, béton, bitume notamment). Il est envisagé de tous les placer dans un conteneur de stockage en béton (Figure 2).

Du point de vue du vieillissement du béton, il est techniquement possible<sup>5</sup> de conférer à ce conteneur une durée de vie de 100 ans au moins.

Au plan mécanique, les conteneurs MAVL sont dimensionnés pour résister à leur empilement, en tenant compte de défauts éventuels de mise en place qui généreraient des concentrations de contraintes.

L'altération des matériaux entraînera à terme une détérioration de ces colis<sup>6</sup>. Cela en rendrait le retrait plus difficile, impliquant de recourir à des méthodes minières. Mais il n'y aura pas d'impact sur la sûreté du stockage, qui repose essentiellement sur les propriétés de confinement des argilites.

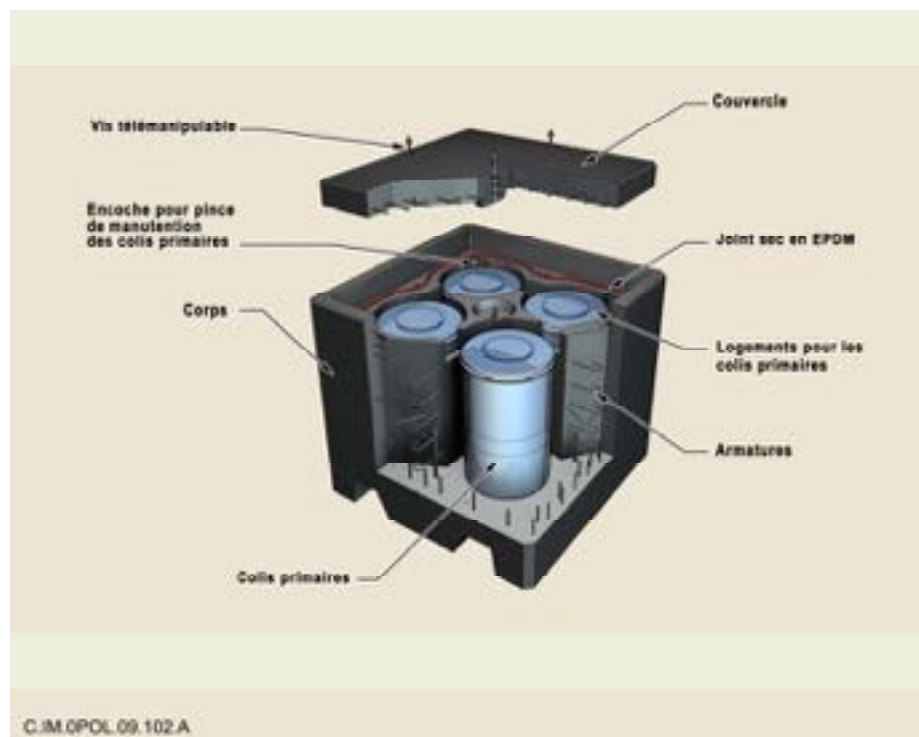


Figure 2

Exemple de conteneur de stockage étudié pour des déchets MAVL

<sup>5</sup> Pour augmenter la durabilité du béton, on emploie des bétons à hautes performances, peu poreux pour retarder les processus d'altération, et on adapte la conception des armatures. Par ailleurs, les conditions physico-chimiques régnant dans les alvéoles de stockage MAVL sont favorables à la durabilité des bétons.

<sup>6</sup> Le mécanisme de resaturation du béton est très long (cf. réponse à la question sur le resserrement des galeries).

## 7. Un refroidissement des colis est-il prévu dans les alvéoles ? Si oui, de quel type et avec quelles conséquences ?

Le stockage des déchets HA doit dissiper la chaleur dégagée par ces déchets. Ce refroidissement est **passif**, par rayonnement et convection naturelle au sein des alvéoles et, surtout, par conduction dans la couche d'argilites.

Le stockage est dimensionné pour que la température de l'argilite au contact du chemisage soit maintenue à moins de 90°C. Dans ce domaine de température, on sait prévoir par modélisation les processus affectant l'évolution en champ proche des ouvrages de stockage, comme l'évolution de la corrosion des aciers et les déformations mécaniques des argilites. Les principaux paramètres de dimensionnement pour respecter cette contrainte sont les distances à maintenir entre les alvéoles, entre les galeries et entre les colis à l'intérieur des alvéoles. Les colis les plus chauds doivent attendre au moins 60 ans avant d'être stockés. Cette attente s'effectue dans des installations d'entreposage, telles qu'il en existe d'ores et déjà sur le site de La Hague.

Pour les alvéoles MAVL, la puissance thermique des colis est suffisamment faible pour ne pas être dimensionnante vis-à-vis des ouvrages. Tant que la ventilation est maintenue, la chaleur résiduelle est évacuée de fait par la ventilation. Lorsqu'on décidera de fermer l'alvéole, cette chaleur se diffusera dans la roche, comme c'est le cas en permanence pour les alvéoles HA. On vérifie que la température dans les bétons n'excède pas le critère de 70°C, afin de préserver toutes leurs caractéristiques mécaniques favorables dans la durée.

## 8. Où en sont les recherches sur le système de surveillance ?

Au sein du dossier remis en 2005, l'Andra s'était attachée à démontrer la faisabilité d'un système de surveillance opérationnel sur toute la période de réversibilité, en se fondant sur des techniques d'auscultation éprouvées (utilisées depuis plusieurs décennies dans les grands barrages et les tunnels, ainsi que dans les installations nucléaires).

Depuis, des résultats de recherches portant sur des dispositifs d'auscultation novateurs ont montré leur potentiel. Ces techniques pourraient donc être utilisées en complément aux dispositifs plus classiques proposés en 2005.

Aussi, pour développer des techniques nouvelles, un « groupement de laboratoires » (GL) a été créé. Ce GL est opérationnel depuis le printemps 2008. Il rassemble des universitaires, des chercheurs d'établissements publics, mais aussi certaines entreprises autour de la thématique des moyens et stratégies d'auscultation.

Deux grands volets sont développés par le GL : l'un visant la création ou l'adaptation de technologies ainsi que leur durcissement pour mieux répondre dans la durée aux conditions d'environnement du stockage (volets « moyens »), l'autre étant dédié au développement d'approches globales optimisant la durabilité et la fiabilité de ces moyens, ainsi que de procédures de certification et de qualification (volet « stratégies »). Le GL aborde ainsi des sujets aussi amont que les nanotechnologies au service des capteurs et de la récupération d'énergie<sup>7</sup>, jusqu'à des thématiques très applicatives envisageant d'ores et déjà la durabilité dans des ambiances de chantier de génie civil.

Sur le volet « moyens », le GL mène actuellement des développements de capteurs permettant à terme des mesures réparties (continues) sur fibre optique de températures et de déformations, des mesures chimiques locales ou de l'évolution des matériaux, des mesures de saturation en eau des matériaux géologiques et ouvragés et des mesures via des systèmes sans fil. Les sujets démarrant à la rentrée 2009 sont relatifs au durcissement des technologies aux radiations, tant pour les capteurs récents tels que les fibres optiques, que pour des capteurs très éprouvés tels que les extensomètres à corde vibrante.

Le volet « stratégies » vise à développer l'évaluation de durabilité et de fiabilité ainsi que la certification des instruments d'auscultation. Il comprend en particulier les essais de mise en œuvre et de qualification de technologies, engagés courant 2008 et qui se renforceront notamment au Laboratoire souterrain. Par exemple, à l'été 2008, des capteurs à fibre optique permettant de réaliser des mesures réparties de déformations ont été noyés dans le radier de l'Espace technologique de Saudron et placés à la surface d'une poutre métallique de la charpente. En septembre 2008 trois technologies destinées à évaluer l'humidité du béton ont été noyées dans les voiles de l'ouvrage R04E15 au Centre de stockage des déchets de faible et moyenne activité à vie courte de l'Aube. En novembre 2008, un extensomètre en forage mono-tige multipoint a été placé dans une galerie expérimentale du Laboratoire souterrain, en parallèle d'un extensomètre en forage multi-tiges, technologie bien maîtrisée au Laboratoire. Le but est de mettre en lumière certaines spécificités des deux technologies qui pourraient être complémentaires, notamment du point de vue de la durabilité et de l'intrusivité. Enfin, dans le prolongement des démonstrations de transmission sans fil à travers les argilites réalisées ces dernières années, de nouveaux tests de transmissions sans fil en galeries souterraines ont été planifiés.

En parallèle, différentes études visent à améliorer l'exploitation et le traitement des mesures. La démarche repose sur la dé-corrélation des influences thermique, hydrique, mécanique, chimique et radiologique. Elle est de ce fait plus large que l'approche actuellement mise en œuvre sur les grands ouvrages de génie civil, où les paramètres mécaniques et thermiques sont le plus souvent les seuls paramètres suivis. Elle a été testée sur les ouvrages instrumentés des Centres de stockage de l'Aube. Des démonstrateurs de dispositifs complets d'auscultation sont ainsi envisagés au Laboratoire souterrain.

<sup>7</sup> On évalue en particulier les possibilités d'exploiter les gradients de température au sein du stockage pour alimenter en énergie les capteurs et systèmes de transmission à distance.

L'Andra poursuit les études de définition des caractéristiques générales du système de surveillance. Des « alvéoles témoins » particulièrement instrumentées permettraient de suivre de manière détaillée l'évolution de chaque type d'ouvrage. Le dispositif serait complété par des mesures réparties dans l'ensemble des installations, pour s'assurer de la représentativité des alvéoles témoins. Des informations complémentaires sur les caractéristiques du système de surveillance étudié sont données en annexe 4.

Parallèlement l'Andra développe les recherches sur la surveillance de l'environnement (voir l'annexe 5), qui avait déjà été initiées dans le cadre de la loi de 1991.

L'Andra a concentré les études sur la surveillance du stockage jusqu'à la décision de fermeture. Après la fermeture, la sûreté est par essence totalement passive. Toutefois, il est envisageable de prolonger la surveillance au-delà de cette fermeture, en étudiant des systèmes qui ne perturberaient pas le stockage et la couche d'argilites du Callovo-Oxfordien.

## **9. Les recherches actuelles visent-elles à permettre une mémoire post-fermeture aussi longue que possible, ou privilégient-elles l'oubli comme moyen de sécurisation du site ?**

Après fermeture des installations souterraines de stockage, la sûreté ne repose ni sur la mémoire du site, ni sur son oubli. Elle repose à long terme sur la capacité de la roche à confiner passivement sur une très longue durée les déchets.

Le guide de sûreté élaboré par l'Autorité de sûreté nucléaire précise que :

- « la sûreté du stockage après fermeture doit être assurée de façon passive afin de protéger les personnes et leur environnement, et qu'elle ne doit pas dépendre d'une surveillance et d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée » ;
- « la mémoire de l'existence du stockage dépend de la pérennité des mesures qui peuvent être mises en œuvre lors de l'archivage et des documents institutionnels résultant de la réglementation ; dans ces conditions, la perte de mémoire de l'existence du stockage peut être raisonnablement située au-delà de 500 ans ».

L'oubli ne peut se décréter. En revanche, la mémoire peut s'organiser et se transmettre. L'Andra ne travaille donc pas à l'oubli du site mais à la possibilité d'en conserver la mémoire, au moins sur la durée minimale de 500 ans mentionnée dans le guide de sûreté, et si possible au-delà.

Pour autant on ne peut exclure à long terme un oubli du stockage. Ce dernier est donc conçu pour rester sûr après son oubli. Ceci fait notamment partie des évaluations internationales et nationales des dossiers de l'Andra.

La solution de mémorisation à long terme mise en place pour les centres de surface permet déjà de conserver la mémoire du site sur une durée minimale de cinq siècles.

L'Andra participe à des réflexions internationales sur la possibilité de mémoriser le site sur une échelle de temps plus grande (à l'échelle millénaire telle qu'étudiée au Japon, et de dizaines de milliers d'années comme les Etats-Unis).

## Annexe 1 : Détails sur les déchets potentiellement destinés au stockage géologique profond

Le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) distingue deux catégories de déchets destinés au stockage en formation géologique profonde : les déchets de haute activité (HA) et les déchets de moyenne activité à vie longue (MAVL).

Les déchets existants comprennent :

- les déchets générés par l'exploitation du premier parc français de réacteurs électronucléaires (filiale uranium naturel graphite gaz - UNGG), aujourd'hui tous arrêtés ;
- les déchets déjà générés à ce jour par l'exploitation du parc de réacteurs à eau pressurisée (REP) installé ;
- les déchets générés par l'exploitation de réacteurs expérimentaux ou prototypes, pour partie arrêtés (réacteur à eau lourde de Brennilis, réacteur à eau pressurisée de Chooz A, réacteur à neutrons rapides Superphénix, etc.), pour partie exploités ;
- les déchets issus d'activités de recherche du CEA et de la défense nationale ;
- les premiers déchets de démantèlement d'installations mises à l'arrêt, déjà produits aujourd'hui.

Les déchets générés par l'exploitation de réacteurs comprennent non seulement ceux produits sur les sites de ces réacteurs, mais aussi ceux induits par la fabrication puis par le traitement des combustibles nucléaires (à Cadarache, La Hague, Marcoule).

Les déchets futurs correspondent :

- aux déchets qui seront produits à l'avenir par les installations nucléaires existantes (parc REP actuel d'EDF, réacteurs expérimentaux du CEA en exploitation, installations de fabrication et de traitement de combustibles, réacteurs et installations pour la défense nationale) ou dont la création a été décidée (EPR<sup>8</sup> ; réacteur expérimental de fusion ITER) ;
- aux déchets de démantèlement des installations.

Pour dimensionner le projet de centre de stockage, un « modèle d'inventaire de dimensionnement » (MID) est établi. Ce modèle identifie des scénarios de production, inventorie les divers colis de déchets à prendre en charge et en décrit les principales caractéristiques (contenu en radionucléides, débit de dose, dégagement de chaleur...). Il comprend des marges pour gérer les incertitudes actuelles sur les quantités de colis futurs, ainsi que sur les caractéristiques des colis.

Une première version du MID avait permis d'élaborer le dossier sur la faisabilité du stockage remis en 2005. Une nouvelle version est élaborée en 2009 pour préparer les prochains rendez-vous prévus par la loi (débat public sur le projet de centre de stockage, puis remise d'un dossier pour évaluations en 2015). La version 2009 du MID prend mieux en compte les déchets de démantèlement des installations actuelles et les déchets issus des derniers combustibles du parc électronucléaire (avant cessation d'exploitation des réacteurs). Pour les déchets futurs, il existe des incertitudes sur la durée d'exploitation du parc électronucléaire actuel : certains réacteurs pourraient voir leur durée d'exploitation prolongée jusqu'à 50, voire 60 ans, mais on ne peut en préjuger aujourd'hui. Ces incertitudes sont gérées par des marges de dimensionnement.

---

<sup>8</sup> Les réacteurs de nouvelle génération EPR (European Pressurized Reactor) constituent une évolution technologique des réacteurs à eau pressurisée REP. Ils forment ainsi une « troisième génération » de réacteurs électronucléaires, alors que les REP en exploitation constituent la deuxième génération et les réacteurs UNGG arrêtés la première génération.

## 1 – Déchets de haute activité (HA)

Les déchets de haute activité sont composés :

- des produits de fission et actinides extraits des combustibles nucléaires usés lors de leur traitement, puis vitrifiés ;
- de certains combustibles usés, non traités.

On distingue trois grands types de colis de déchets HA (le MID décompose plus finement ces trois types pour rendre compte précisément de la variabilité des caractéristiques techniques des colis) :

### ✓ Déchets « C0 »

Les déchets « C0 » sont des déchets HA vitrifiés dont le dégagement thermique est suffisamment modéré pour qu'ils puissent faire l'objet d'un stockage dès la mise en exploitation du centre (si l'autorisation en est donnée). Ils correspondent à des productions anciennes, à Marcoule et à La Hague, provenant de la première filière française de réacteurs électronucléaires UNGG.

### ✓ Déchets HA vitrifiés hors « C0 »

Les autres déchets HA vitrifiés correspondent au traitement des combustibles nucléaires du parc actuel. Ces déchets de puissance thermique plus élevée doivent refroidir au minimum 60 ans avant de pouvoir être stockés. En pratique, les premiers déchets HA vitrifiés hors « C0 » pourraient être stockés vers 2050. Ces déchets sont conditionnés dans un conteneur standardisé appelé CSD-V (Cf. Figure 1).



Figure 3 Conteneur standardisé de déchets vitrifiés (CSD-V)

### ✓ Déchets « CU3 »

Les déchets « CU3 » sont des combustibles de réacteurs de recherches ou de la propulsion navale. Leur faible volume et leurs caractéristiques spécifiques sont peu compatibles avec un traitement industriel à La Hague. Ces déchets présentent un dégagement thermique comparable aux déchets « C0 ».



## 2 – Déchets de moyenne activité à vie longue (MAVL)

Les déchets MAVL recouvrent une grande diversité de colis, en termes de nature de déchets, de mode de conditionnement et de conteneurage. 46 colis-types<sup>9</sup> MAVL ont ainsi été identifiés au stade actuel.

Les déchets MAVL contiennent moins de radioactivité que les déchets HA, et leur puissance thermique plus faible permettrait de les stocker de façon plus compacte au sein de la couche argileuse. En conséquence, l'emprise souterraine de la zone de stockage des déchets MAVL serait plus faible que celle des déchets HA.

Les déchets MAVL les plus radioactifs sont :

- les déchets de structure des combustibles usés, séparés lors du traitement de ces combustibles ; il s'agit d'éléments de tubes et de pièces métalliques des assemblages combustibles, qui contenaient les pastilles de combustible à l'uranium et au plutonium ; aujourd'hui, les déchets de structure issus de l'exploitation des réacteurs REP sont compactés et conditionnés en Conteneurs Standard de Déchets Compactés (CSD-C), de géométrie proche de celle du CSD-V (Cf. Figure 4) ;
- les déchets « activés », composés d'éléments internes des cuves de réacteurs nucléaires (REP) ayant notamment servi au pilotage de ces réacteurs.



Figure 4 Conteneur Standard de Déchets Compactés (CSD-C)

Les autres déchets rattachés à la catégorie MAVL dans le MID proviennent principalement de l'exploitation des usines de fabrication et de traitement des combustibles nucléaires, ainsi que des installations du CEA : pièces ou dispositifs d'exploitation usagés, appelés « déchets technologiques » ; effluents liquides solidifiés lors de leur conditionnement en colis.

Environ 50 % du volume total des déchets MAVL est représenté par :

- Les déchets de structure et technologiques conditionnés en CSD-C ;
- Les effluents bitumés conditionnés dans des fûts en acier. La Figure 5 présente un conteneur de déchets représentatif de cette catégorie ;
- Les déchets activés et technologiques conditionnés en conteneurs béton (C1PG) et en conteneurs béton fibres (CBFC'2). A titre d'exemple de cette catégorie, la Figure 6 présente un conteneur de type CBFC'2.

<sup>9</sup> Tous les déchets rattachés à un même colis-type présentent des caractéristiques similaires.



Figure 5 Conteneur d'effluents bitumés



Figure 6 Conteneur en béton fibres (CBF-C'2)

Les études sur la définition du modèle d'inventaire de dimensionnement se poursuivent. Elles s'effectuent en lien avec la tenue à jour de l'inventaire national des matières et des déchets radioactifs et du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. Ce travail permettra de fixer la nature et le volume des déchets destinés au stockage géologique profond d'ici au débat public sur le projet, puis à la demande d'autorisation de création du centre qui sera évaluée à partir de 2015.

## Annexe 2 : Compléments techniques à la réponse sur la période de récupérabilité

Un stockage fermé n'implique pas que les déchets soient irrécupérables : il reste toujours possible de les reprendre avec des méthodes minières, comme l'a relevé la CNE<sup>10</sup>.

L'Andra étudie des dispositions techniques qui faciliteraient la récupération des colis de déchets, fondées sur :

- le reconditionnement des colis « primaires » présentés en annexe 1, dans des conteneurs de stockage particulièrement robustes et durables, présentant une géométrie précise et bien maîtrisée ;
- des alvéoles de stockage qui elles aussi ont une géométrie bien maîtrisée, avec des matériaux de construction durables ;
- des dispositions complémentaires pour limiter les échanges d'air et d'eau au sein du stockage, susceptibles d'altérer dans le temps les matériaux.

En tenant compte des évolutions physiques et chimiques, ces dispositions sont séculaires.

Ainsi les alvéoles HA, dont le chemisage est en acier, sont conçues pour résister aux efforts appliqués par la roche pendant plusieurs siècles. L'objectif est de protéger les surconteneurs pendant toute la période « thermique », période durant laquelle les surconteneurs doivent être étanches pour éviter le contact entre l'eau et un verre encore trop chaud. Les alvéoles HA ne sont pas ventilées. La Figure 7 présente une alvéole HA, après mise en place des colis.

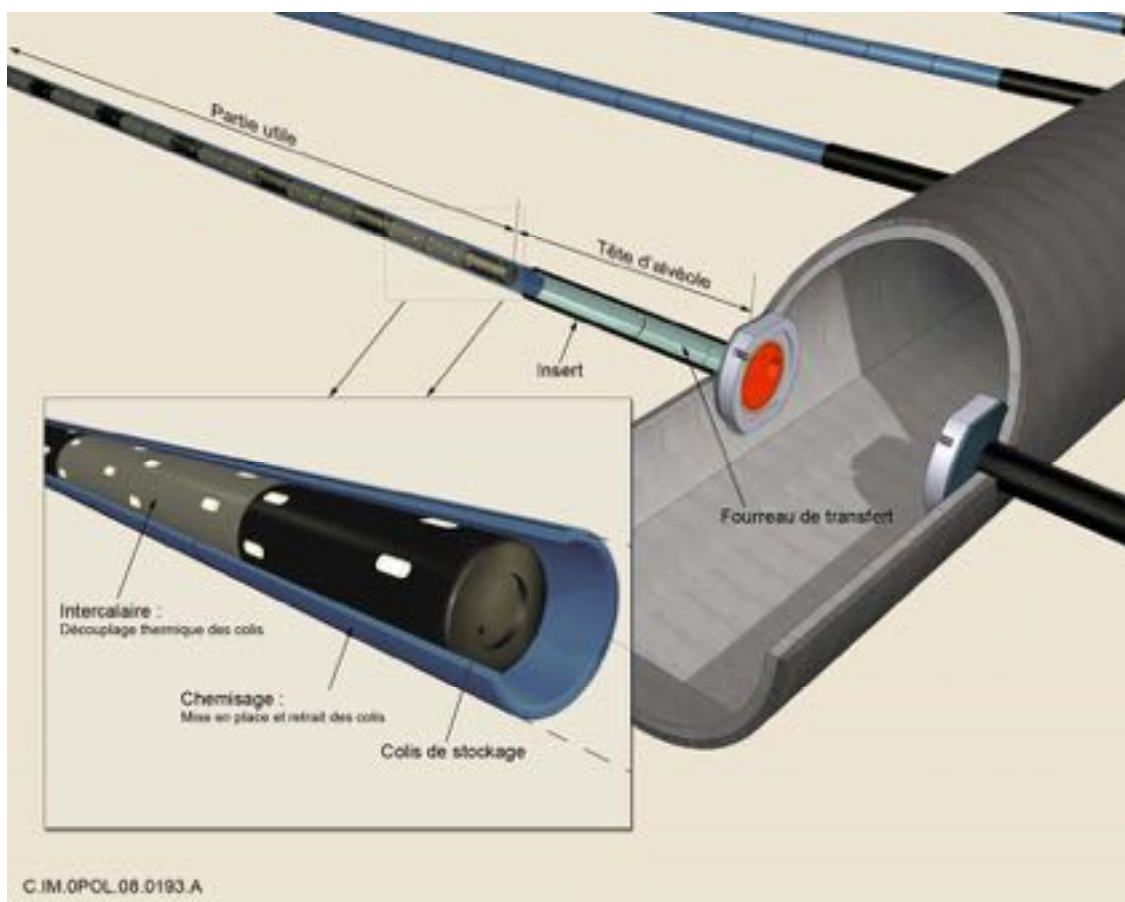


Figure 7 Alvéole HA

<sup>10</sup> Cf. Rapport CNE « Réflexions sur la réversibilité des stockages » de juin 1998, p 16.

Dans les alvéoles MAVL, le revêtement en béton peut être conçu suffisamment épais pour résister au moins cent ans sans maintenance. La Figure 8 ci-dessous présente l'exemple d'une alvéole MAVL peu avant la fin de la mise en place des colis. Dans le cas présenté, les colis stockés sont des colis CBF-C'2 évoqués plus haut et illustrés Figure 6.

La ventilation des alvéoles MAVL (et plus généralement des galeries souterraines) assèche ces ouvrages et l'argilite au voisinage ; cela ralentit les déformations de l'argilite, contribuant ainsi à diminuer la charge mécanique supportée par les revêtements, et cela ralentit aussi les processus chimiques d'altération du béton.

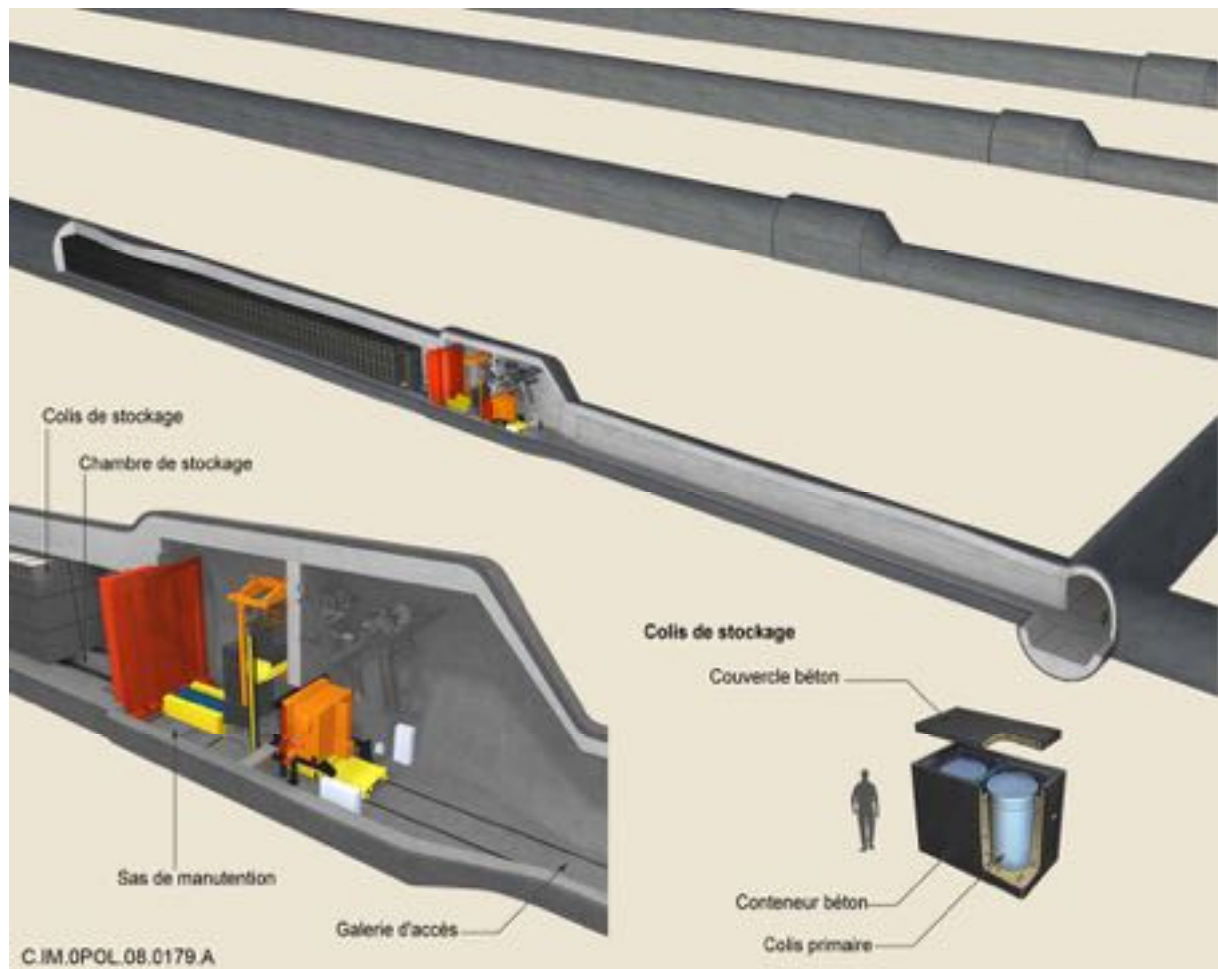


Figure 8 Alvéole MAVL en fin de remplissage

Les puits et galeries d'accès aux alvéoles de stockage pourront faire l'objet d'opérations de maintenance, et donc permettre d'accéder aux alvéoles aussi longtemps qu'il sera décidé de laisser ces ouvrages ouverts.

Les opérations de fermeture rendent plus complexe un retrait éventuel des colis (sans pour autant le rendre impossible). C'est pourquoi les concepts proposés par l'Andra évitent de devoir reboucher le stockage au fur et à mesure de la mise en place des colis, contrairement à ce qui est envisagé dans d'autres pays, comme la Suède<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> Des démonstrations technologiques de retrait de colis après rebouchage ont été effectuées en Suède.

Cependant ces concepts laissent aussi la possibilité aux générations suivantes de refermer les installations souterraines de stockage par étapes progressives. Une telle possibilité permettrait à ces générations de diminuer les charges qui pèseront sur elles et sur leurs successeurs, tout en sachant que le franchissement de chaque étape rendra plus complexe les opérations de récupération.

Il est à noter que la revue du dossier 2005 par un groupe d'experts internationaux sous l'égide de l'AEN<sup>12</sup> a conclu que le dossier présentait une approche viable de la réversibilité, sans compromis vis-à-vis de la sûreté opérationnelle ou à long terme. Tout en reconnaissant que l'exigence de récupérabilité des colis existe dans d'autres pays et peut être satisfaite par d'autres concepts que ceux développés par l'Andra, le groupe d'experts internationaux a relevé que les concepts Andra sont plus orientés vers la réversibilité que les autres sur des échelles de temps relativement longues.

---

<sup>12</sup> AEN (2006) : Safety of Geological Disposal of High-level and Long-lived Radioactive Waste in France - An International Peer Review of the "Dossier 2005 Argile" Concerning Disposal in the Callovo-Oxfordian Formation, NEA Report 6178 <http://www.nea.fr/html/rwm/reports/2006/nea6179-havl.pdf>.

### **Annexe 3 : Compléments techniques sur les perspectives de transmutation**

Les recherches menées actuellement sur la transmutation sont focalisées sur les actinides. Cela permettrait de diminuer la radiotoxicité des déchets à très long terme et la charge thermique des déchets HA<sup>13</sup>. La mise en œuvre industrielle de ces technologies suppose la réalisation de réacteurs nucléaires innovants, dits de 4<sup>ème</sup> génération<sup>14</sup>. Les combustibles qui pourraient être « brûlés » dans ces réacteurs seraient constitués d'uranium, de plutonium et d'actinides mineurs (américium et éventuellement curium) qui auraient été séparés préalablement des autres radionucléides présents dans les combustibles usés.

En l'état actuel des perspectives offertes par les recherches sur la transmutation, les futurs réacteurs continueraient à produire des déchets relevant d'un stockage géologique profond.

Une partie de l'inventaire radioactif considéré pour le stockage en couche argileuse profonde est constituée de radionucléides non concernés par les recherches en cours : produits de fission, produits d'activation.

---

<sup>13</sup> Une partie du dégagement thermique des déchets HA provient de l'américium 241.

<sup>14</sup> Les EPR forment la troisième génération (voir l'annexe 1).

## Annexe 4 : Caractéristiques générales et architecture d'un système de surveillance

### La surveillance des colis de déchets

L'Andra étudie les possibilités de surveillance des colis en surface et en alvéoles de stockage. En surface, il s'agit de surveiller que les caractéristiques des déchets, conditionnés en colis primaires, sont conformes à ce qui aura été spécifié pour être acceptés en stockage. L'Andra dispose d'une expérience importante en matière de surveillance et de contrôle de colis dans le cadre de l'exploitation des Centres de stockage de l'Aube : outre la surveillance du processus de production (chez le producteur), cette surveillance comporte la vérification de la conformité des caractéristiques des colis lors de la préparation de leur expédition vers le centre de stockage, des contrôles systématiques des colis à réception pour vérifier les paramètres essentiels aisément accessibles à la mesure et des contrôles sur des colis prélevés pour confirmer des paramètres plus difficilement accessibles. La surveillance des colis destinés au stockage en couche argileuse profonde mettrait en œuvre des dispositions similaires. Il est à noter qu'une surveillance est d'ores et déjà en place chez les producteurs de déchets pour les colis actuellement en production ou déjà produits.

### La surveillance des installations de surface

La surveillance des installations de surface répond à des objectifs partagés par toute installation nucléaire de base (INB) et toute installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE) : sécurité du personnel, protection de l'environnement. On bénéficie d'un grand retour d'expérience de la surveillance de ce type d'installations. L'Andra a notamment acquis un retour d'expérience important avec l'exploitation des centres de stockage en surface. Dans une logique d'amélioration continue, les progrès scientifiques et technologiques réalisés en matière de capteurs et de technologies d'acquisition et de transfert de données sont suivis de près, et certains développements sont menés en lien avec les recherches sur la surveillance des installations souterraines.

### La surveillance des installations souterraines

La surveillance des installations souterraines du stockage commencera à la construction des ouvrages et se poursuivra, de façon de plus en plus globale tout au long de l'exploitation, jusqu'à la fermeture voire au-delà. La spécificité d'un tel système de surveillance est la longévité requise, associée à des possibilités de maintenance des instruments réduites par l'inaccessibilité des alvéoles en exploitation. Plusieurs types d'approches complémentaires sont donc étudiés par l'Andra ; ils pourraient être mis en œuvre en parallèle :

- des **inspections régulières** éventuellement appuyées sur des méthodes et essais non destructifs et des **capteurs fixes**. Le choix entre ces différentes technologies sera optimisé (alternance ou simultanément) en fonction des différentes phases de vie du stockage : (i) lors de la phase de construction quand elle est totalement accessible, (ii) lors de l'exploitation quand seuls des engins robotisés peuvent y pénétrer (iii) après scellement quand l'alvéole est devenue inaccessible ;
- en sus des **mesures directes**, les **mesures indirectes** ouvrent des perspectives très larges. Par exemple, la corrosion des éléments métalliques pourrait être évaluée en caractérisant la composition chimique de l'atmosphère des alvéoles ;
- des **mesures locales** et des **mesures déportées** en dehors des zones sensibles telles que les alvéoles de stockage scellées où la maintenance des dispositifs d'auscultation n'est pas possible. On peut par exemple suivre l'évolution de la température des alvéoles HA par des forages instrumentés parallèles à l'alvéole, permettant d'une part de réduire les débits de doses imposés aux capteurs et d'autre part d'envisager des maintenances en cas de défaillance.

Outre la complémentarité, le système de surveillance pourra être conçu avec des redondances pour en accroître la fiabilité :

- redondances de capteurs identiques sur les mêmes ouvrages pour pallier les défaillances éventuelles de certains capteurs au fil du temps ;
- redondances de capteurs entre ouvrages de comportement identique ;
- redondances de mesures réalisées avec différentes technologies de capteurs ;
- redondance entre les suivis directs et indirects évoqués ci-dessus.

La Figure 9 ci-dessous illustre dans le cas d'une alvéole MAVL quelques unes de ces redondances et complémentarités

### Capteurs ponctuels (robustes, précis, discrets : sondes Pt100 $\Omega$ , CCV...)



#### Associés aux mesures par fibres optiques:

Technologie plus récente (moins connue) – une durabilité non acquise

Son avantage: elle fournit des mesures réparties sur toute la fibre

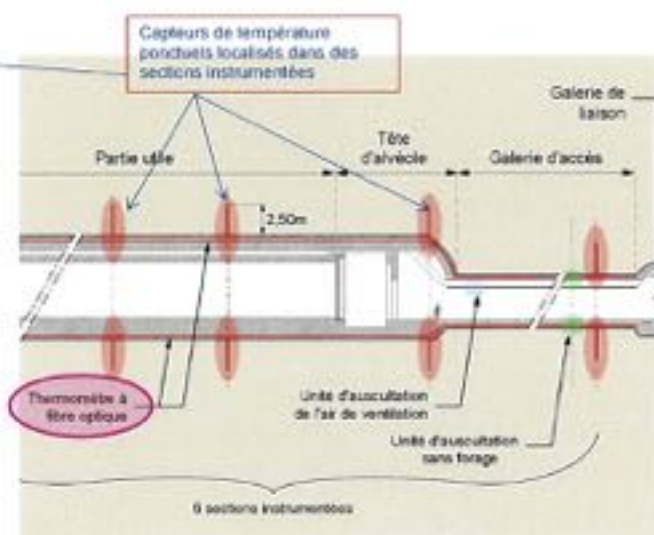


Figure 9

*Association de mesures ponctuelles et réparties pour la surveillance d'une alvéole MAVL*



## Annexe 5 : La surveillance de l'environnement

Pour concevoir la surveillance de l'environnement autour du stockage, l'Andra s'appuiera sur le retour d'expérience des centres de stockage existants et du Laboratoire souterrain. Une disposition spécifique est la mise en place dès 2007 d'un Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) sur le centre de Meuse/Haute-Marne. Cet Observatoire préfigure le suivi de l'environnement qui sera réalisé lors de l'exploitation du stockage pendant une durée d'environ un siècle. En ce sens, il constitue un outil d'acquisition de données environnementales exceptionnel en France.

Au-delà du suivi réglementaire de la qualité des eaux, de l'air et des bio-indicateurs imposé à toute installation industrielle ou nucléaire, l'OPE s'attache à étudier les écosystèmes dans la zone où sera implanté le futur centre de stockage. Dans un premier temps, ses travaux d'analyses, d'inventaires, de cartographies rendent possible l'établissement d'un état initial de l'environnement sur une durée de dix ans, en prenant en compte les variations naturelles. Cet état initial portera notamment sur les richesses naturelles et les espaces agricoles, forestiers, ou de loisirs, ainsi que sur les biens matériels et le patrimoine culturel susceptibles d'être impactés par le projet ; il comportera aussi un état radiologique de l'environnement. Aujourd'hui, les études concernant la flore, les amphibiens, les insectes, les grands mammifères et les chauves-souris sont d'ores et déjà lancées et d'autres sur la faune aquatique et apicole le seront prochainement. Pour les activités humaines, un observatoire des pratiques agricoles et forestières de la zone d'étude se met en place associant l'Andra aux chambres d'agriculture. Cet Observatoire permettra également d'étudier les interactions entre les différents compartiments environnementaux (faune, flore, eaux, air, sols...) et de suivre leur évolution dans le temps. Il déterminera aussi des indicateurs pertinents de contrôle de l'environnement.

Il est à noter qu'au-delà des données environnementales qui intéressent directement le projet de stockage, cet Observatoire répondra à des questionnements scientifiques plus larges : fonctionnement détaillé des écosystèmes, compréhension des cycles biogéochimiques... Des associations environnementales et de nombreux laboratoires de recherche interviennent ainsi dans le cadre de l'OPE. Des mesures recueillies au travers de l'activité de l'OPE sont déjà partagées dans le cadre de réseaux internationaux. Dans cet esprit, l'Andra ambitionne d'obtenir en 2010 pour l'OPE une labellisation de système d'observation au niveau national.

Deux outils majeurs sont prévus en appui de cet Observatoire, une écothèque et une base de données. L'écothèque permettra d'assurer la conservation à long terme des échantillons (eau, air, sol, flore et faune) prélevés dans le cadre de l'Observatoire pérenne de l'environnement. Elle garantira la traçabilité des mesures environnementales pour une durée au moins équivalente à celle de l'exploitation du centre de stockage. Cette écothèque sera une installation de haute technologie, unique en France pour ce qui concerne le milieu continental. Cette installation de conservation et de partage d'informations pourra être ouverte à d'autres organismes de recherche. En attendant son ouverture, les échantillons déjà prélevés sont conservés à l'observatoire de ressources sur la qualité de l'environnement du CNRS à Pau. Par ailleurs, l'Andra s'est dotée d'une base de données d'enregistrement de toutes les données de surveillance de l'Environnement afin d'en faciliter la diffusion auprès de la communauté scientifique et du grand public. Cette base de données « DESIREE » contient déjà les données relatives à l'environnement de surface de quatre sites exploités par l'Agence.