

# RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION D'INSTALLATIONS D'ENTREPOSAGE S'INSCRIVANT DANS LA COMPLEMENTARITE AVEC LE STOCKAGE

DOCUMENT REMIS AU MINISTRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE  
DANS LE CADRE DU PLAN NATIONAL DE GESTION DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS 2013-2015.

**Identification**

CG.NT.ADPG.14.0038

Pages : 20

Ce document, bien que propriété de l'Andra,  
peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation

DOCUMENT TECHNIQUE

**RECOMMANDATIONS POUR LA  
CONCEPTION D'INSTALLATIONS  
D'ENTREPOSAGE S'INSCRIVANT  
DANS LA COMPLEMENTARITE  
AVEC LE STOCKAGE**

## SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>Contexte et objet</b>	<b>4</b>
1.1	<i>Les orientations fixées par la loi du 28 juin 2006</i>	4
1.2	<i>La complémentarité entre le stockage réversible et l'entreposage</i>	4
1.3	<i>Bilan des études et recherches sur l'entreposage</i>	5
1.4	<i>Elaboration de recommandations pour la conception d'installations d'entreposage s'inscrivant dans la complémentarité avec le stockage</i>	6
<b>2.</b>	<b>Les dispositions favorables à la durabilité des installations d'entreposage</b>	<b>7</b>
2.1	<i>Les bétons armés de structure</i>	7
2.2	<i>Les composants métalliques</i>	9
2.3	<i>Les matériaux des colis de déchets</i>	9
<b>3.</b>	<b>La surveillance</b>	<b>10</b>
3.1	<i>La surveillance des colis de déchets</i>	10
3.2	<i>Acquisition de connaissances durant la phase d'entreposage</i>	11
3.3	<i>La surveillance des composants de l'installation d'entreposage</i>	11
<b>4.</b>	<b>La conception de l'entreposage lié à la réversibilité du stockage</b>	<b>13</b>
4.1	<i>L'entreposage de colis HA retirés du stockage</i>	13
4.1.1	L'entreposage « en casemate »	13
4.1.1	L'entreposage « en puits »	14
4.1.2	L'entreposage « en nappe »	15
4.2	<i>L'entreposage de colis MAVL retirés du stockage</i>	16
4.2.1	L'entreposage « en halls ou en alvéoles »	16
<b>5.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>18</b>
	<b>Références</b>	<b>19</b>

# 1. Contexte et objet

## 1.1 Les orientations fixées par la loi du 28 juin 2006

Après quinze années de recherches sur la gestion des déchets radioactifs et leur évaluation, la loi de programme du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs [1] a décidé la poursuite des études et recherches relatives à la gestion des déchets radioactifs de haute activité (HA) ou de moyenne activité à vie longue (MAVL) selon trois axes complémentaires (séparation-transmutation, stockage réversible profond, entreposage). L'article 2 de la loi précise que « *[la] recherche et la mise en œuvre des moyens nécessaires à la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs sont entreprises afin de prévenir ou de limiter les charges qui seront supportées par les générations futures* ».

La loi du 28 juin 2006 a chargé l'Andra de réaliser ou faire réaliser, conformément au Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR), des recherches et études sur l'entreposage et le stockage en couche géologique profonde et d'assurer leur coordination.

L'entreposage est défini comme l'opération consistant à placer les déchets radioactifs à titre temporaire dans une installation spécialement aménagée en surface ou en faible profondeur à cet effet, dans l'attente de les récupérer. L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a rappelé dans son avis du 1<sup>er</sup> février 2006 que l'entreposage ne constitue pas une solution définitive pour la gestion des déchets radioactifs [2]. L'article L. 542-1-2 du code de l'environnement stipule qu'« *après entreposage, les déchets radioactifs ultimes ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou en faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde* ».

Le stockage en couche géologique profonde est défini comme l'opération consistant à placer les déchets radioactifs dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive dans le respect de la protection de la santé des personnes, de la sécurité et de l'environnement ainsi que du principe de réversibilité. Les conditions de réversibilité seront définies par une future loi.

## 1.2 La complémentarité entre le stockage réversible et l'entreposage

L'entreposage remplit plusieurs fonctions en complémentarité du stockage profond réversible :

- il permet de gérer les déchets HA et MAVL produits dans l'attente de la mise en exploitation du Centre industriel de stockage géologique (projet Cigéo) ;
- il apporte de la flexibilité pour la construction et l'exploitation du centre de stockage ;
- il permet une phase de décroissance radioactive avant mise en stockage, qui est techniquement nécessaire pour certains déchets, en particulier les déchets HA fortement exothermiques ;
- il peut constituer un moyen de surveillance de l'évolution des colis de déchets avant leur stockage ;
- il permet le cas échéant de gérer les colis de déchets qui seraient retirés du stockage.

En matière de complémentarité, le premier objectif de l'entreposage est de permettre d'attendre la mise en exploitation du centre de stockage. Le recensement des besoins en entreposage réalisé en 2012 [3] a montré que les créations et extensions d'installations projetées d'ici 2025 sur les sites de production des déchets radioactifs permettent de répondre, en termes de capacité et de durée, aux besoins d'entreposage des colis de déchets HA et MAVL produits à cet horizon. Cette analyse sera mise à jour en 2015 par Areva, le CEA et EDF [4] en tenant compte des productions futures de déchets, du conditionnement et de l'ordonnancement des expéditions vers le centre de stockage qui fait l'objet d'une programmation prévisionnelle avec l'Andra dans le cadre du programme industriel de gestion des déchets.

Au-delà de la mise en exploitation du centre de stockage, l'entreposage intervient dans la gestion par étapes du stockage. Cette gestion par étapes, associée à un processus décisionnel ouvert et progressif, constitue un volet des propositions de l'Andra en matière de réversibilité.

La revue du projet de stockage Cigéo effectuée en 2011 sous l'égide du ministère chargé de l'énergie, a recommandé de disposer sur le site du stockage d'une capacité « tampon » d'entreposage permettant de gérer de façon optimale les arrivées et la meilleure utilisation des volumes de stockage, mais excluant tout entreposage visant à se substituer à celui assuré par les producteurs de déchets. Par conséquent après la mise en service du centre de stockage, l'entreposage des colis de déchets HA et MAVL sera toujours réalisé sur les sites de production pour une décroissance de la radioactivité et de la puissance thermique ou pour la gestion des flux d'expédition vers le stockage.

Pour certains déchets, une phase de décroissance radioactive en entreposage avant la mise en stockage est techniquement nécessaire. Cela concerne particulièrement les déchets HA fortement exothermiques. En effet leur dégagement thermique initial (jusqu'à 4 kilowatts par colis à la production) est incompatible avec les fonctions de sûreté du stockage. Une durée minimale de 60 ans est nécessaire pour les colis CSD-V d'Areva - La Hague (famille F1-3-01 de l'inventaire national [5]), leur conférant une puissance thermique de 500 watts par colis, compatible avec une mise en stockage.

Dans l'éventualité d'un retrait de colis de déchets stockés, la construction de nouvelles installations d'entreposage pourrait être nécessaire, si le nombre de colis retirés excède les capacités tampon d'entreposage des installations de surface du centre de stockage. Différents concepts d'entreposage ont été analysés dans cette perspective. Au plan technique, il suffirait de quelques années (de l'ordre de cinq ans) pour créer, éventuellement par tranches successives, de nouvelles installations d'entreposage capables de gérer les colis que l'on aurait décidé de retirer du stockage.

### 1.3 Bilan des études et recherches sur l'entreposage

Conformément au PNGMDR, l'Andra a remis au Gouvernement en 2012 un rapport dressant le bilan des études et recherches qu'elle a coordonnées sur l'entreposage des colis de déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MAVL) [3].

Dans son avis de mars 2013 [7], la Commission nationale d'évaluation (CNE) a considéré que les réflexions et les recherches sur l'entreposage, conduites en étroite concertation avec les producteurs, sont parvenues à maturité. Les résultats obtenus permettent de concevoir un programme de développement des entreposages en harmonie avec les besoins des producteurs et les développements du stockage géologique profond.

Il existe aujourd'hui un important retour d'expérience industriel de l'entreposage. Les entrepôts existants disposent de capacités pour accueillir des déchets supplémentaires, principalement sur le site Areva de La Hague (50) et sur les sites CEA de Cadarache (13) et de Marcoule (30). Néanmoins, des besoins en entreposage nouveaux apparaissent progressivement avec la jeunesse des installations, les productions futures des déchets, les évolutions en matière de conditionnement. A terme, les besoins évolueront aussi, avec la mise en exploitation du centre de stockage.

Les études et recherches réalisées depuis 2006 ont visé à la fois à recenser ces besoins nouveaux et à proposer des réponses techniques en exploitant l'expérience acquise. Pour ce faire elles ont exploré les différents volets de la complémentarité entre l'entreposage et le stockage. Elles se sont intéressées à l'ingénierie des entrepôts et à leur comportement phénoménologique. Des pistes d'amélioration et des options techniques novatrices ont été examinées.

Au travers d'une collaboration entre l'Andra, Areva, le CEA et EDF, des avancées peuvent d'ores et déjà être intégrées dans la conception des projets industriels. Cela a concerné particulièrement l'extension de l'entreposage des déchets de haute activité vitrifiés mis en exploitation en 2013 par Areva sur le site de La Hague.

Les études et recherches coordonnées par l'Andra portent sur l'entreposage des déchets radioactifs HA et MAVL. L'entreposage des combustibles usés dans l'attente de leur traitement n'entre pas dans le périmètre de ces études et recherches (qu'il s'agisse d'un entreposage de décroissance ou de transit

avant traitement, pour les combustibles UOX, ou d'attente d'un traitement différé, pour les combustibles MOX).

#### **1.4 Elaboration de recommandations pour la conception d'installations d'entreposage s'inscrivant dans la complémentarité avec le stockage**

Le décret du 27 décembre 2013 établissant les prescriptions du PNGMDR [4] a chargé l'Andra de poursuivre le recueil et la capitalisation du retour d'expérience de la construction et de l'exploitation des installations existantes ou en développement, de continuer les recherches sur le comportement des matériaux utilisés pour la réalisation d'ouvrages d'entreposage et des matériaux de colisage et les techniques de surveillance, en vue d'optimiser la durabilité, l'auscultation, l'évacuation de la chaleur et, si nécessaire, la polyvalence de ces entreposages. Il a également demandé à l'Andra d'approfondir les concepts d'entreposage liés à la réversibilité en tenant compte notamment de l'état des colis retirés du stockage.

Le décret PNGMDR [4] a chargé l'Andra d'élaborer d'ici fin 2014, après consultation d'Areva, du CEA et d'EDF, des recommandations pour la conception d'installations d'entreposage s'inscrivant dans la complémentarité avec le stockage. Ces recommandations font l'objet du présent document et s'appuient sur les résultats des précédentes phases d'études et de recherches ainsi que sur les échanges avec Areva, le CEA et EDF. Elles portent en particulier sur le choix des matériaux en lien avec la durabilité des entrepôts (chapitre 2), les systèmes de surveillance (chapitre 3) et la conception d'entrepôts en lien avec la réversibilité du stockage (chapitre 4).

## 2. Les dispositions favorables à la durabilité d'installations d'entreposage

Les différents volets de la complémentarité entre l'entreposage et le stockage conduisent à envisager des durées de fonctionnement d'entrepôts jusqu'à environ un siècle : d'une part certains colis pourront y être entreposés sur une durée supérieure à 50 ans ; d'autre part on pourrait aussi utiliser des installations d'entreposage avec rotation des colis allant jusqu'à cette échelle de temps, qui correspond à celle de l'exploitation du stockage.

Le CEA et l'Andra ont réalisé une revue commune de l'ensemble du programme de recherches sur l'entreposage de longue durée réalisé par le CEA dans le cadre de la loi de 1991, dans l'objectif de transférer à l'Andra dans les meilleures conditions et le plus complètement possible les connaissances issues de ces études menées jusqu'en 2005. Sur les différents thèmes, le CEA et l'Andra se sont attachés à mettre en évidence les besoins complémentaires qui existeraient dans le cadre de la consolidation du dossier d'un entrepôt de durée séculaire, durée correspondant à l'objectif des études de l'Andra dans une complémentarité avec le stockage.

L'Andra a mené un programme d'acquisition de connaissances scientifiques dans une optique d'augmentation de durabilité et de robustesse des entrepôts par rapport à l'état de l'art. Cela a porté principalement sur le comportement et l'évolution des bétons ; des recherches ont aussi été menées sur la corrosion des matériaux métalliques en situation d'entreposage. Il est à noter qu'une partie de ces recherches intéressent également le projet Cigéo, notamment pour les dispositifs qui permettraient de conforter la durabilité et la robustesse des ouvrages sur une durée d'ordre séculaire.

L'Andra a également mené une analyse phénoménologique de l'entreposage, sur le modèle de la méthode d'analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) qu'elle met en œuvre pour le stockage profond. L'analyse a mis en lumière les processus et les dispositions qui permettraient de conforter la durabilité et la robustesse des ouvrages sur une période séculaire.

En règle générale les marges de dimensionnement des composants sont liées aux possibilités de surveillance des phénomènes de vieillissement et à la facilité de la maintenance préventive. Le vieillissement relativement rapide d'un composant sous l'effet de sollicitations particulières : charges mécaniques, cycles de températures, gaz acides etc. peut être admissible si, d'une part, il peut être suivi et si, d'autre part, le remplacement du composant est techniquement possible sans exposition excessive des opérateurs au rayonnement.

### 2.1 Les bétons armés de structure

L'un des principaux mécanismes de vieillissement des structures en béton armé est lié à la pénétration dans le matériau du gaz carbonique de l'air. Elle entraîne une carbonatation de la pâte de ciment hydratée, accompagnée d'une acidification qui peut provoquer une dé-passivation des armatures en acier et une augmentation significative de leur corrosion. La venue au contact des bétons d'ions agressifs comme les ions chlorure est susceptible d'accélérer cette corrosion. La carbonatation dépend étroitement des transferts en phase gazeuse au sein du matériau et donc de son état de dessiccation, de sa porosité et de son état de fissuration.

Pour limiter la fissuration des bétons en particulier dans les parties de l'entreposage où il est mis en œuvre en grandes masses, il faut tout d'abord réduire la montée en température lors de la prise. Les ciments à faible chaleur spécifique d'hydratation sont en général ceux qui ont une teneur en clinker Portland faible (par exemple ciment CEM III/A, B ou C ou encore CEM V/A ou B suivant les références de la norme européenne EN 206/CN).

Lors de la construction de voiles de grande épaisseur, il est possible de limiter les élévations de température dues à l'hydratation du ciment, notamment en effectuant le banchage par plots alternés. Ce procédé limite le risque de fissuration au droit des joints de reprise de bétonnage.

En fonctionnement, les gradients élevés de température et/ou d'humidité dans les parois en béton armé sont susceptibles de provoquer des retraits différentiels et donc des contraintes hydro ou thermomécaniques, qui peuvent être importantes car les structures des entrepôts sont en général

hyperstatiques. Ces contraintes s'ajoutent à celles créées par les charges mécaniques et peuvent provoquer une fissuration qui traverse les éléments de structure.

Des dispositions spécifiques peuvent être mises en œuvre pour limiter la porosité des bétons. Des rapports massiques eau sur ciment faibles (égaux ou inférieurs à 0,45 voir [3]) peuvent être mis en œuvre en introduisant des fluidifiants dans la composition des bétons. L'emploi d'adjuvants permet aussi de réduire à une fraction négligeable la macroporosité connectée dans laquelle l'eau peut pénétrer par capillarité.

A porosité égale, plus la taille des pores est petite, plus le transfert des gaz et des liquides à travers le béton est lent. La taille des pores dépend en grande partie de la composition des ciments, un pourcentage élevé de laitier et de cendre étant un facteur favorable (par exemple ciment CEM V/A ou B voir EN 206/CN)).

En règle générale, quel que soit le ciment choisi pour le fabriquer, un béton est d'autant plus résistant à la carbonatation qu'il est plus compact et donc que sa résistance mécanique est plus élevée. Les bétons à hautes performances sont particulièrement durables, la profondeur de carbonatation étant corrélée à la résistance en compression simple.

Un autre mécanisme de dégradation des bétons à base de liants hydrauliques est lié à une réaction chimique entre alcalins du béton et certains granulats siliceux ou silicatés en présence d'eau. Cette alcali-réaction se traduit par l'apparition de nouvelles phases gonflantes (gels silico-calco-alcalins) à l'interface entre granulats et matrice cimentaire, pouvant aboutir à un gonflement et une fissuration. Les granulats calcaires sont recommandés car ils garantissent l'absence de réactivité. Les granulats silico-calcaires peuvent être utilisés en respectant la norme française FD P 18-464 : Béton - Dispositions pour prévenir les phénomènes d'alcali-réaction.

En fonctionnement, de fortes élévations de température sont susceptibles de modifier la structure physico-chimique des bétons. La limitation de la température en fonctionnement normal (typiquement moins de 65 °C) réduit le risque de dégradation de leurs caractéristiques mécaniques et de confinement [3].

Entre les parements intérieurs et extérieurs des voiles, des dalles de couverture et des radiers peuvent s'instaurer des contrastes de température et d'humidité, d'autant plus importants que le chargement thermique de l'entreposage est plus élevé et/ou que le climat du site d'implantation est plus froid et plus humide. Les mesures suivantes vis-à-vis des gradients de température et d'humidité peuvent limiter les risques de microfissuration :

#### *Gradient thermique*

- à l'intérieur d'un entrepôt de colis fortement exothermiques et irradiants, interposer des écrans composés de matériaux isolants et opaques aux rayonnements (du  $\gamma$  à l'infrarouge), pour limiter les transferts thermiques par conduction et par rayonnement entre les colis et les structures en béton de l'entreposage ; un refroidissement de ces écrans isolants par la ventilation de l'entreposage, contribue à leur efficacité et à leur tenue dans le temps ;
- à l'extérieur de l'entrepôt, protéger les voiles et la dalle de couverture des variations de température par des bardages et une isolation thermique ;

#### *Gradient d'humidité*

- à l'extérieur de l'entrepôt, protéger les voiles et la dalle de couverture des précipitations et éventuellement des embruns salins par des bardages étanches à l'eau. Si l'entrepôt comporte une partie enterrée, le béton armé de la structure peut être protégé des eaux souterraines par un couvage étanche et un réseau de drainage.

Après la prise des liants hydrauliques, les structures en béton armé présentent un retrait dû à l'hydratation du ciment et au refroidissement qui la suit. Ultérieurement, la dessiccation du béton durant les périodes sèches, les variations de température et sur le long terme la carbonatation, sont susceptibles de provoquer d'autres retraits. Dans la pratique courante du génie civil, les variations dimensionnelles sont gérées par la mise en place de joints de dilatation. La distance qui les sépare dans la structure est fonction des choix constructifs et des conditions d'environnement.



Des entrepôts de petite ou de moyenne capacité peuvent être réalisés sans joint de dilatation. Dans les installations où des joints de dilatation sont nécessaires, placer ces joints dans des zones de l'installation accessibles en exploitation permet de les inspecter et le cas échéant de les maintenir. Les pièces d'étanchéité des joints couramment utilisés actuellement ont une longévité maximale de l'ordre de la cinquantaine d'années.

Des débits de dose importants peuvent provoquer une radiolyse des composants de l'air atmosphérique et créer des oxydes d'azote, de l'ozone, etc. qui en cas d'accumulation locale, sont des facteurs d'acidification des liants hydrauliques et de corrosion des pièces métalliques et des armatures du béton armé et doivent être pris en compte pour le dimensionnement de l'installation.

## 2.2 Les composants métalliques

Au contact d'un air dont l'humidité relative est inférieure à 40 %, les aciers non alliés et les fontes présentent une corrosion uniforme dite « sèche », dont la profondeur reste limitée après une centaine d'années [3]. Même si les conditions climatiques locales rendent possible un air extérieur saturé d'humidité dans une plage de température variant entre - 15 °C et + 39 °C, le diagramme de l'air humide (Mollier) indique que ce degré de dessiccation peut être atteint à l'intérieur de l'entreposage si l'échauffement de l'air y est égal à 14 °C ou plus.

Dans les entreposages de colis exothermiques, la chaleur produite peut être utilisée pour assurer cet échauffement. Pour éviter une condensation éventuelle sur les pièces métalliques placées en amont du circuit de ventilation, une partie de l'air chaud extrait en sortie peut être réintroduite en entrée.

Si l'air ne peut pas être réchauffé, la corrosion des aciers et des fontes est dite « atmosphérique », tant que l'humidité relative reste inférieure à 80 % [3]. Les connaissances actuelles de ce type de phénomènes indiquent que sur la centaine d'années, une profondeur de corrosion pouvant atteindre le millimètre, doit être prise en compte.

En environnement maritime, les chlorures amenés par les embruns peuvent accélérer les mécanismes de corrosion de l'acier. Sur l'acier inoxydable, elle se présente sous la forme de piqûres.

L'état de surface initial des pièces métalliques intervient dans la vitesse de corrosion. Un acier poli et nettoyé présente une cinétique de corrosion beaucoup plus lente qu'un acier pré-corrodé ou microfissuré.

Les pièces en acier inoxydable qui ont subi un formage et donc des déformations importantes ne sont susceptibles de préserver leur résistance à la corrosion que si elles ont été préalablement traitées, par exemple par grenailage et/ou par recuit.

## 2.3 Les matériaux des colis de déchets

Pour les colis de déchets vitrifiés exothermiques, les conditions d'entreposage doivent permettre de maintenir la température à cœur des déchets vitrifiés inférieure à 500 °C pour éviter le risque de recristallisation et de limiter les charges mécaniques appliquées conformément aux spécifications de fabrication des colis.

A proximité de colis de déchets fortement irradiants et/ou exothermiques ne peuvent être placés que des colis de déchets ne contenant pas de matériaux sensibles à la radiolyse, et supportant une température relativement élevée. Cela diminue les risques de détérioration du conteneur par corrosion interne et d'altération de la forme physico-chimique du déchet.

Une température excessive est de nature à induire une inhomogénéité macroscopique des enrobés bitumineux (par sédimentation des enrobés) susceptible de conduire à modifier leur comportement sous irradiation, et ultérieurement leur altération sous eau. Par conséquent les colis d'enrobés bitumineux ne doivent pas être entreposés à proximité d'une source de chaleur telle que des empilements de colis exothermiques.

Pour le maintien des propriétés mécaniques des conteneurs et des matrices en bétons des colis de déchets, la température devrait être limitée (typiquement moins de 65 °C).

### 3. La surveillance

Les recherches sur la surveillance bénéficient des travaux correspondants menés sur le projet de stockage réversible.

Dans les entreposages HA – MAVL dont la durée d'exploitation peut être prolongée (à l'échelle de la centaine d'années) et où les colis de déchets sont maintenus sur des périodes longues, le suivi du vieillissement des matériaux et composants devient une partie importante de la surveillance.

#### 3.1 La surveillance des colis de déchets

L'entreposage peut constituer un moyen de surveillance de l'évolution des colis de déchets avant leur stockage.

La surveillance porte sur les paramètres qui garantissent le maintien de la fonction de confinement des substances radioactives et toxiques qu'ils contiennent, ainsi que la permanence de la fonction qui consiste à pouvoir les reprendre à l'issue de la période d'entreposage.

La bonne interprétation de la surveillance faite sur les colis en entreposage, implique la connaissance de leur état initial et donc dépend des critères d'admission qu'ils doivent respecter, du contrôle de leur respect en entrée et de l'enregistrement des résultats.

En se basant sur le retour d'expérience de la surveillance d'installations d'entreposage existantes, deux niveaux de surveillance peuvent être considérés :

- Premier niveau : une surveillance globale pour un groupe de colis entreposés dans le même puits ou le même alvéole
- Second niveau : une surveillance spécifique sur un ou des colis témoins identifiés.

Le placement des colis dans des structures de regroupement du type casiers qui sont empilés dans les alvéoles ou les puits, peuvent faciliter un examen visuel en place par caméras vidéo, voire des mesures au contact. Il peut aussi dans certains cas, réduire le nombre d'opérations de manutention pour retirer un colis donné.

Le second niveau de surveillance peut être assuré par un système installé à demeure ou amené par le système de manutention, à proximité du ou de colis témoins des évolutions potentielles que pourraient subir l'ensemble des colis. Il peut aussi passer par un retrait du ou des colis de leur position d'entreposage, pour les déplacer vers une cellule ou une zone dédiée à la mesure et à l'auscultation dans l'installation d'entreposage.

Concernant la surveillance des critères liés à la température d'entreposage des déchets (cf. § 2.3), la surveillance de premier niveau peut, par exemple, porter sur la température des parois du puits / de l'alvéole d'entreposage ou de l'air de refroidissement qui le balaie. La surveillance de second niveau pourrait porter sur la température de surface des colis par des caméras infrarouge par exemple ou éventuellement sur la puissance thermique de colis témoins, isolés dans des conditions thermodynamiques contrôlées (cloche de mesure).

Concernant le confinement assuré par les colis de déchets, la surveillance de premier niveau pourrait être effectuée sur la radioactivité de l'air de ventilation. La surveillance de second niveau concernerait la contamination surfacique du conteneur qui pourrait être mesurée par frottis sur les colis témoins prélevés périodiquement suivant un programme préétabli ou sur les colis qui seraient issus d'un alvéole ou d'un puits où une anomalie aurait été détectée.

L'apparition en surface de traces de corrosion sur les conteneurs en acier inoxydable ou non allié et d'altération sur les conteneurs en béton pourrait être surveillée avant que ces phénomènes ne se développent et affectent la capacité de confinement et de préhension des colis. La surveillance de premier niveau des conditions d'environnement des colis en entreposage pourrait porter sur la température et le degré d'hygrométrie de l'air de ventilation, complétée éventuellement par le suivi

d'échantillons de matériaux placés sur un porte-échantillons amovible<sup>1</sup>. La surveillance de second niveau pourrait être réalisée par un examen visuel par caméra vidéo en place ou dans une cellule/zone de mesure et le cas échéant, par des contrôles d'épaisseur et/ou des micro- prélèvements.

### 3.2 Acquisition de connaissances durant la phase d'entreposage

Certaines familles de colis de déchets MAVL génèrent des gaz, essentiellement de l'hydrogène, par radiolyse des matières organiques ou de l'eau des matrices cimentaires et les relâchent dans l'air de ventilation. La connaissance de ce processus est nécessaire pour le stockage de ces déchets.

Certaines familles de colis de déchets MAVL relâchent des radionucléides gazeux en très faibles quantités : tritium, carbone 14, chlore 36, argon 39, krypton 85, iode 129, radon 222. La phase d'entreposage des colis peut être mise à profit pour acquérir des données relatives à la production de ces gaz. En particulier, si ces colis sont regroupés par familles de colis homogènes dans des alvéoles équipés de circuits de ventilation séparés, les teneurs en gaz de radiolyse et/ou en gaz radioactifs pourraient être mesurées dans le circuit de ventilation comme indiqué sur la figure 1.

Des mesures directes des dégagements gazeux de colis témoins pourraient également être réalisées.

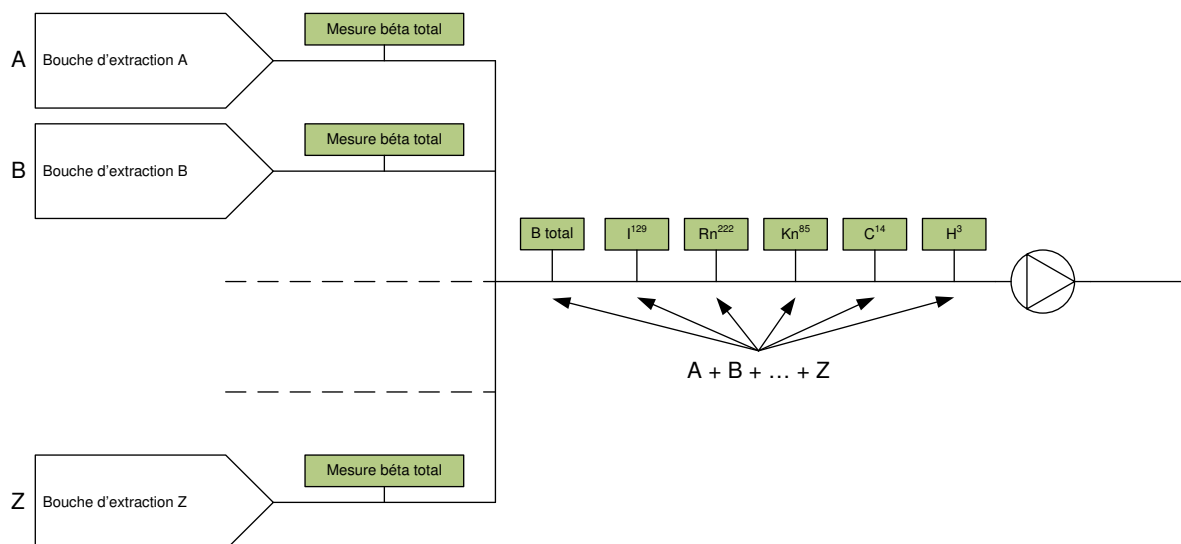


Figure 1 : Alvéoles d'entreposage de colis de déchets MAVL équipés de circuits de ventilation séparés et connectables à un circuit de mesure de la concentration en gaz émis.

### 3.3 La surveillance des composants de l'installation d'entreposage

En phase d'exploitation de l'installation d'entreposage, les systèmes de ventilation et de manutention peuvent généralement être surveillés et maintenus au contact.

Les composants fixes, tels que les puits d'entreposage métalliques, les gaines de ventilation et les structures en béton armé, etc. peuvent être équipés d'un dispositif spécifique de surveillance en place et leur maintenance éventuelle doit généralement être télé-opérée.

<sup>1</sup> Sur le modèle de ce qui a été mis en œuvre dans plusieurs entrepôts de construction récente, un porte-échantillons amovible permet de retirer périodiquement des échantillons caractéristiques des matériaux des composants de l'installation et des colis de déchets pour analyse. Ces échantillons sont positionnés par le système de manutention des colis dans une partie de l'entrepôt où l'environnement (température et humidité de l'air, irradiation, etc) est représentatif des paramètres d'environnement dans l'installation.

Pour la bonne interprétation de la surveillance de ces composants fixes, une bonne connaissance de leur état initial est nécessaire. Elle repose sur les contrôles de fabrication et sur un suivi détaillé des étapes de construction.

Les variations au cours du temps des charges et de l'environnement peuvent utilement être suivies et enregistrées, afin de pouvoir les corrélérer aux données de la surveillance.

La température peut faire l'objet de mesures ponctuelles et/ou de type répartie (par fibres optiques), pour accéder aux champs de température.

L'altération éventuelle des bétons armés se présente visuellement sous la forme de fissures dont l'apparition peut être surveillée par caméras vidéo haute résolution. Elles sont l'indice de déformations en traction.

Avant l'apparition des fissures, les déformations en traction peuvent faire l'objet de mesures distribuées par fibres optiques (en mesure Brillouin ou Rayleigh) ou de mesures ponctuelles par des capteurs de déformation (capteurs à corde vibrante, par exemple). Ces capteurs sont associés généralement à des capteurs de température qui sont requis entre autre, pour leur étalonnage. Ils sont capables de fonctionner à hautes températures (jusqu'à 115 °C) [3] et en ambiance irradiante. Leur seuil de détection en traction comme en compression est de 0,3  $\mu\text{m}/\text{m}$  [3].

Les déformations des structures de génie civil peuvent être analysées à partir du déplacement de leurs différentes parties : tassements, déplacements différentiels au droit des joints de dilatation, etc.

Des échantillons de matériaux constitutifs des composants de l'installation peuvent être mis en charge sur des bâtis de traction et placés dans l'installation sur un porte-échantillons. Ces échantillons peuvent ensuite faire l'objet d'un suivi périodique.

## 4. La conception de l'entreposage lié à la réversibilité du stockage

L'Andra a examiné avec l'appui technique d'ingénieries spécialisées les différentes solutions techniques envisageables pour assurer les fonctions d'un entreposage de colis de déchets retirés du stockage. Les concepts d'entreposage retenus dérivent de concepts existants qui ont été développés et mis en œuvre par Areva, le CEA ou EDF durant les deux dernières décennies, sur leur site de production ou à l'étranger. Les critères de sélection étaient la robustesse des systèmes qui assurent les fonctions de sûreté, la polyvalence, l'aptitude à une exploitation durable, l'accessibilité aux colis et la modularité, c'est-à-dire la possibilité d'adjoindre des modules supplémentaires à un entreposage sans interrompre l'exploitation.

Les concepts examinés recourent à des structures de regroupement des colis : casiers ou canisters.

Il est à noter que deux options se présenteraient pour placer en entreposage des colis de déchets retirés du stockage ; soit utiliser des emplacements disponibles dans les installations existantes sur les sites des producteurs, soit construire de nouveaux entreposages.

### 4.1 L'entreposage de colis HA retirés du stockage

#### 4.1.1 L'entreposage « en casemate »

L'entreposage en casemate est une solution basée sur le concept NUHOMS<sup>©</sup> proposé par Areva Transnucléaire. Elle aurait l'avantage de simplifier les équipements et les opérations de transfert.

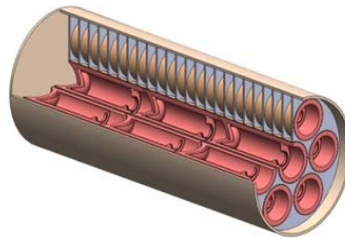
Les colis de déchets HA en surconteneur de stockage<sup>2</sup> ou sous leur forme primaire, après une opération d'ouverture du surconteneur et d'extraction du colis primaire, seraient disposés suivant leurs dimensions, par groupes de 21 à 28 dans des canisters cylindriques en acier, fermés par un couvercle soudé ou boulonné et étanches (cf. figure 2). Les canisters constitueraient une barrière de confinement. Dans l'hypothèse d'une contamination de colis récupérés, le placement en canisters pourrait éventuellement être réalisé sans décontamination préalable. Ces opérations de mise en canisters seraient réalisées dans un atelier de conditionnement sur Cigéo, à créer.

Chaque canister serait placé dans un emballage de transport qui assurerait la radioprotection pendant les opérations de transfert jusqu'au site d'entreposage. Les opérations de chargement des emballages de transport pourraient être effectuées dans l'atelier de déchargement des emballages de transport de Cigéo, moyennant éventuellement une adaptation aux caractéristiques de ces nouveaux emballages.

A son arrivée sur le site d'entreposage, chaque emballage de transport serait accosté à une casemate d'entreposage. Après ouverture de l'emballage et de l'opercule fermant la casemate, le canister serait introduit dans celle-ci par glissement horizontal. Cette solution éviterait un atelier de chargement - déchargement sur le site d'entreposage.

Une fois les canisters placés horizontalement dans les casemates individuelles en béton armé, celles-ci assureraient pendant la phase d'entreposage, la radioprotection et le refroidissement à l'aide d'un circuit de ventilation naturelle comportant une prise d'air en partie basse et une cheminée.

<sup>2</sup> Dans le concept de stockage développé pour Cigéo, les colis HA sont stockés après placement dans un surconteneur en acier non allié principalement pour des raisons de sûreté après-fermeture.



*Figure 2 : Concept d'entreposage de colis HA en conteneur de stockage disposés par groupe de 21 dans des canisters fermés placés dans des casemates assurant la radioprotection et un refroidissement par ventilation naturelle. Des canisters de mêmes dimensions externes peuvent être aménagés pour accueillir 28 colis primaires HA.*

#### 4.1.1 L'entreposage « en puits »

L'entreposage en puits refroidis par ventilation naturelle est une solution déclinée du concept d'entreposage des verres existant à La Hague (entreposage E-EV-SE) qui a la caractéristique d'être particulièrement compact.

Comme dans l'entreposage E-EV-SE, les colis HA seraient empilés en puits verticaux fermés qui assureraient une deuxième barrière de confinement, les colis constituant la première. Les puits seraient refroidis extérieurement en ventilation naturelle verticale par thermo-siphonage.

A la différence de E-EV-SE, les colis seraient regroupés dans des casiers cylindriques de diamètre identique (éventuellement de hauteur différente) avant d'être empilés dans les puits. De plus, les casiers pourraient recevoir soit des colis primaires (6 colis), soit des colis de stockage (3 surconteneurs). Un tel entreposage pourrait gérer indifféremment des colis provenant initialement des sites de La Hague (CSD-V, CSD-U) ou de Marcoule (AVM).

Compte tenu des débits de doses cumulés des colis HA regroupés en casiers, la manutention sous hotte au-dessus de la dalle de radioprotection qui surmonte les puits d'entreposage, telle qu'elle est pratiquée sur l'entreposage E-EV-SE, ne pourrait plus être mise en œuvre. La masse de la hotte imposerait un renforcement des structures en béton armé de l'entreposage. Une autre solution, mise en œuvre sur les entrepôts CASCAD (CEA Cadarache) ou HABOG (COVRA aux Pays Bas) est envisageable avec suppression de la hotte de manutention et radioprotection assurée par le hall de manutention surmontant les puits d'entreposage (cf. figure 3). L'accessibilité du hall pour les

opérateurs serait cependant possible entre les phases de manutention, périodes durant lesquelles les puits d'entreposage sont fermés par leur bouchon de radioprotection.

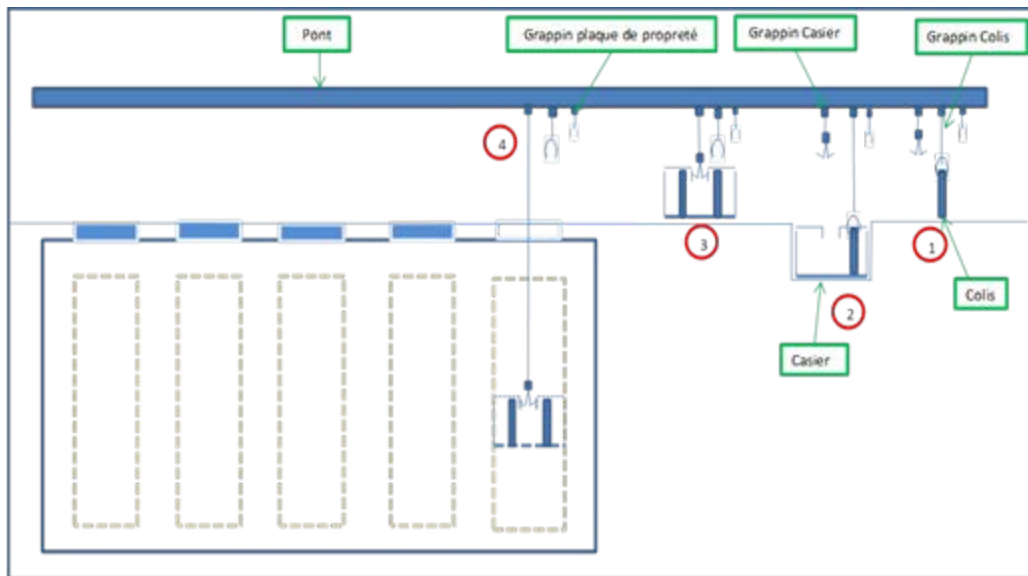


Figure 3 : Solution d'entreposage par empilement de colis HA primaires ou de stockage regroupés en casiers de diamètre identique en puits verticaux fermés et ventilés par thermo-siphonage.

#### 4.1.2 L'entreposage « en nappe »

L'entreposage en nappe est une solution dérivée du concept d'entreposage des colis standards de déchets compactés (CSD-C) de La Hague (entreposage ECC).

Comme dans ECC et dans les entreposages tampons de Cigéo, les colis de déchets vitrifiés (primaires ou en conteneur de stockage) seraient posés verticalement sur des supports plans horizontaux disposés au-dessus des dalles planchers.

Les capacités d'un tel entreposage peuvent être augmentées par ajout de nouveaux modules.

Le refroidissement serait assuré par ventilation mécanique forcée circulant horizontalement. Les halls d'entreposage constitueraient une barrière de confinement avec une atmosphère en dépression et une filtration de l'air en sortie (cf. figure 4).

Un regroupement des colis dans des casiers manutentionnés par navettes et/ou ponts roulants téléopérés, permettrait une polyvalence de l'entreposage. Cette disposition est également favorable vis-à-vis de l'efficacité du système de ventilation en guidant les veines d'air.

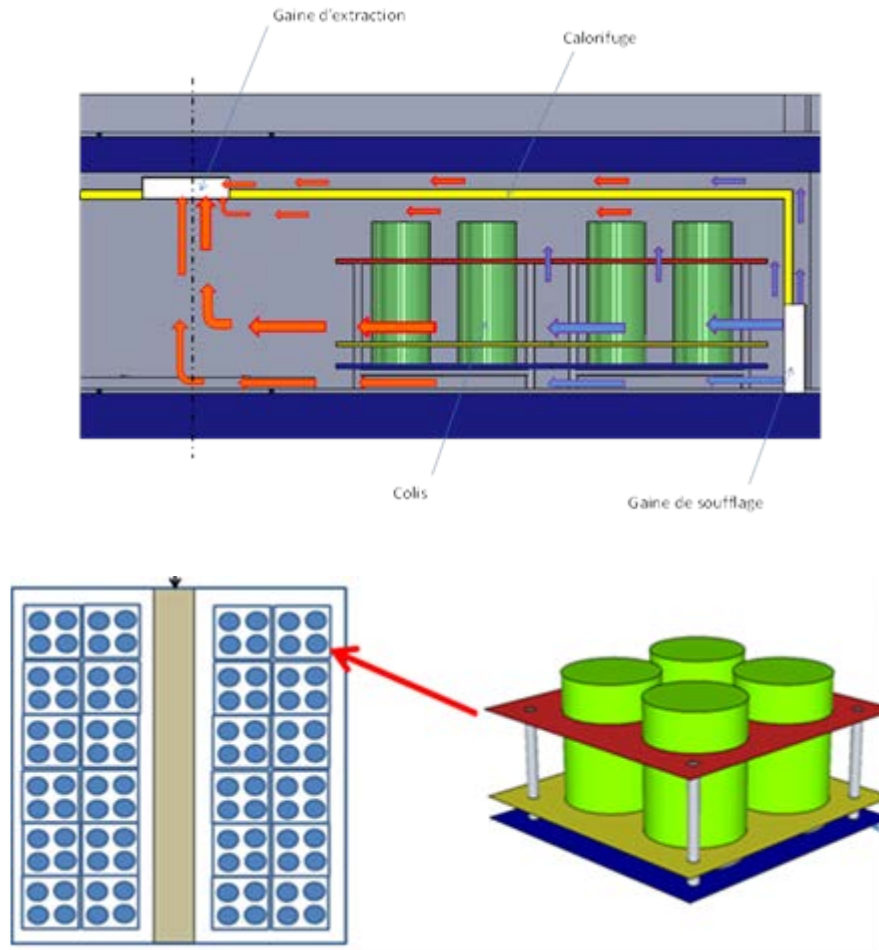


Figure 4 : Solution d'entreposage de colis HA primaires ou en surconteneur de stockage, regroupés en casiers posés sur dalles - planchers. Le refroidissement serait assuré par ventilation mécanique canalisée horizontalement par les casiers de regroupement.

## 4.2 L'entreposage de colis MAVL retirés du stockage

### 4.2.1 L'entreposage « en halls ou en alvéoles »

Au vu de la masse, des dimensions et des débits de doses d'une partie des colis de stockage MAVL (ensemble constitué des colis primaires et de leur conteneur de stockage en béton), la faisabilité technique d'emballages de transport nécessaires à leur expédition ne peut être garantie. Les colis primaires devraient alors être extraits de leur conteneur de stockage avant expédition.

Les colis primaires MAVL présentent des caractéristiques plus variées que les colis de déchets HA. Par exemple leur masse varie entre 400 et 9 000 kg. Une grande polyvalence des entrepôts et des ateliers associés pourrait donc s'avérer utile.

Le concept ci-après illustre les possibilités d'entreposage polyvalent.



Les colis primaires de petites dimensions pourraient être manutentionnés en entreposage dans des casiers, comme cela est mis en œuvre pour les fûts de déchets MAVL dans l'entreposage DE-EB d'Areva - La Hague.

L'entreposage serait composé de un à plusieurs modules, desservis par un atelier dans lequel il serait procédé à l'ouverture de l'emballage de transport à l'extraction des colis et le cas échéant, au placement dans les casiers et au pré-empilement (cf. figure 5).

Chaque module pourrait être divisé en alvéoles dont la ventilation serait adaptable aux caractéristiques des familles de colis MAVL : puissance thermique, production de gaz.

Les colis primaires (à l'unité ou regroupés en casiers) pourraient être transportés empilés sur deux ou trois niveaux par une navette filoguidée équipée de fourches de manutention rétractables ou par un pont roulant télé-opéré.

L'accès aux colis, pour le retrait ou pour la surveillance en place serait facilité par un empilement des casiers de colis sur deux rangées, de part et d'autre d'une allée de desserte centrale (cf. figure 5).

Les dispositions en entreposage qui facilitent l'accès aux colis se traduisent par une emprise plus importante des installations. Si la surveillance des colis pouvait être limitée, les empilements des colis primaires ou des casiers pourraient être réalisés sur plus de 3 niveaux. La manutention devrait alors être télé-opérée par pont-roulants et les empilements pourraient être disposés sur plus de deux rangées de façon à augmenter la compacité de l'entreposage.

La structure en béton armé de l'entreposage assurerait la radioprotection et la deuxième barrière de confinement (le colis étant la première), grâce à une ventilation mécanique dotée en sortie de filtres de très haute efficacité. Cette disposition est reprise des entreposages MAVL de La Hague : ECC, de Marcoule : l'EIP ou du Bugey : ICEDA.

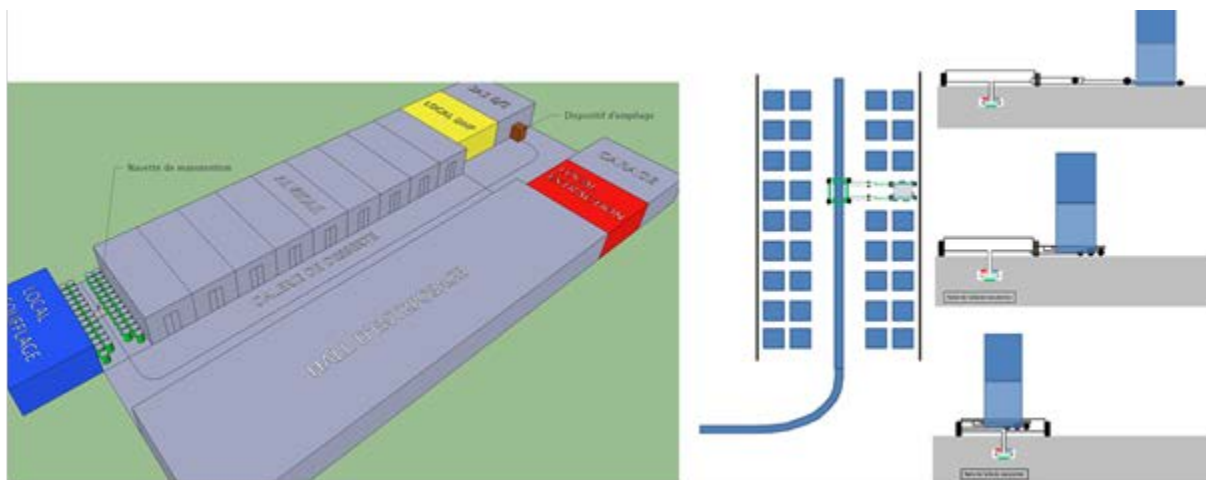


Figure 5 : Schéma représentant l'intérieur d'un bâtiment d'entreposage polyvalent de colis MAVL primaires, regroupés dans des casiers pré-empilés sur deux ou trois niveaux et manutentionnés par navette filoguidée, dotée d'une fourche télescopique. Chaque module est divisé en alvéoles dont la ventilation est adaptable aux caractéristiques des familles de colis.

## 5. Conclusion

Les études et recherches sur l'entreposage des colis de déchets HA et MAVL ont été coordonnées par l'Andra pour répondre à l'objectif fixé par la loi de programme du 26 juin 2006 de complémentarité avec le stockage profond réversible.

Le retour d'expérience industriel acquis sur les entreposages de colis de déchets HA – MAVL construits et exploités par Areva, le CEA et EDF sur leurs sites de production, et les résultats des recherches antérieures, en particulier sur la durabilité des matériaux et sur les systèmes de surveillance, ont constitué une base de départ.

Il est apparu que la complémentarité de fonctionnement d'une installation d'entreposage avec le stockage pouvait signifier sa capacité de fonctionner sur des durées jusqu'à la centaine d'années, et celle d'adapter en cours d'exploitation le nombre de ses modules à un besoin en augmentation. Pour l'entreposage de colis retirés du stockage, le cas échéant, il peut être utile de pouvoir accueillir dans une même installation des colis de types divers sous leur forme primaire ou placés en surconteneur de stockage.

La perspective d'une durée d'exploitation sur une centaine d'années conduit à privilégier une facilité de maintenance des équipements et des structures de l'entreposage ainsi qu'une accessibilité aux colis de déchets pour les surveiller en place ou pour les retirer à des fins d'examen.

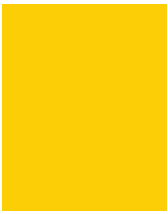
L'Andra a mené des études préliminaires sur différents concepts d'entreposage (au niveau de détail d'une esquisse). Leur adéquation aux besoins éventuels liés à la réversibilité du stockage a été examinée. Des systèmes de surveillance ont été proposés.

Dans leur ensemble les études de concepts d'entreposage se sont caractérisées par leur caractère générique vis-à-vis des colis à prendre en compte et du site d'implantation. Elles ont permis d'identifier différentes innovations qui pourraient s'appliquer à de futures installations. A ce stade, approfondir la conception d'ingénierie de futurs entrepôts dans un cadre générique ne devrait plus apporter d'avancées significatives.

La coopération entre Areva et l'Andra sur l'extension de l'entreposage des verres à La Hague (EEVLH) a montré l'intérêt d'actions concertées visant à intégrer les résultats des recherches à des projets industriels d'extension d'installations existantes ou de création de nouvelles installations. Dans le cas particulier d'EEVLH, un travail important a été réalisé par l'Andra et Areva pour intégrer les avancées des recherches dans la conception de cette installation. Ce travail permet d'envisager une durée de vie accrue de l'installation.

## REFERENCES

- [1] Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs.
- [2] Avis de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) du 1<sup>er</sup> février 2006 sur les recherches menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991.
- [3] Bilan des études et recherches sur l'entreposage – Rapport Andra C.RP.ADPG.13.0001
- [4] Décret n° 2013-1304 du 27 décembre 2013 pris pour application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs.
- [5] Catalogue descriptif des familles - Inventaire national des matières et des déchets radioactifs 2012, Andra.
- [6] Délibération du Conseil d'administration de l'Andra du 5 mai 2014 relative aux suites données à Cigéo à l'issue du débat public.
- [7] Avis de la Commission sur les propositions de l'Andra : l'entreposage des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HAVL-MAVL) – Commission nationale d'évaluation, mars 2013.



AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION  
DES DÉCHETS RADIOACTIFS

1-7, rue Jean-Monnet  
92298 Châtenay-Malabry cedex

[www.andra.fr](http://www.andra.fr)

