Note Volumes de déchets en stockage géologique :
Une comparaison des options stockage direct et retraitement

Résumé

La présente note propose une analyse des volumes attendus de l'exploitation du parc nucléaire français actuel en termes de déchets haute et moyenne activité à vie longue. Cette analyse prend en compte l'ensemble des déchets destinés dans la doctrine actuelle au stockage géologique, englobant les combustibles irradiés non retraités d'une part, et les déchets haute et moyenne activité à vie longue issus du retraitement des combustibles d'autre part.

La note s'appuie sur le dossier de conception du stockage géologique déposé en 2005 par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) pour recenser l'ensemble des catégories de déchets concernés et établir pour chacune d'entre elles, sur la base des caractéristiques retenues au niveau des colis, de leur conditionnement final et des ouvrages de stockage, une évaluation des volumes unitaires. Les indicateurs retenus pour une comparaison des différentes options portent sur le volume de colis primaire, le volume de colis conditionné pour le stockage, le volume de galerie par colis, et l'emprise au sol (surface) correspondante.

Ces estimations de volumes unitaires sont destinées à une comparaison des bilans associés aux différentes options de gestion. L'analyse montre d'abord que les estimations et comparaisons officielles introduisent de nombreux biais en faveur du retraitement, avant de proposer une base rigoureuse de comparaison entre le stockage direct de 1 tonne de combustible à l'uranium (UOX) et le stockage des déchets haute et moyenne activité à vie longue issus du retraitement ainsi que des combustibles irradiés issus de la réutilisation des matières (uranium de retraitement et plutonium) pour un total de 1 tonne de combustible également (pour une équivalence énergétique).

Les résultats basés sur cette méthodologie de comparaison ne confirment pas le fort avantage attribué au retraitement par les estimations officielles. Au contraire, le stockage direct du combustible irradié s'avère supérieur point par point (volume de colis, volume d'ouvrage de stockage, emprise) au retraitement dans les conditions techniques caractérisant l'usine de La Hague lors de sa mise en service. L'effort d'optimisation sur la prodution des déchets de l'usine confère un avantage relatif au retraitement dans les conditions actuelles pour une partie des indicateurs. Toutefois, l'introduction d'une optimisation comparable sur le conditionnement du combustible irradié, qui n'a pas été développée en France, rétablit un avantage comparatif au stockage direct selon tous les critères.

Sommaire

1. Objet 2
2. Contraintes méthodologiques 2
3. Hypothèses sur le stockage de l'Andra 2
- 3.1. Concept de stockage de l'Andra 2
- 3.2. Déchets pris en compte par l'Andra 3
- 3.3. Colisage final des déchets prévu par l'Andra 8
- 3.4. Concepts de galeries de stockage 11

4. Projections de l'Andra 18
- 4.1. Scénarios pris en compte par l'Andra 18
- 4.2. Influence de la thermique 20
- 4.3. Emprise du stockage 21
- 4.4. Volume des déchets en stockage 23

5. Estimations de WISE-Paris 24
- 5.1. Biais des estimations classiques 24
- 5.2. Inventaire pris en compte pour une comparaison retraitement / non retraitement 24
- 5.3. Volumes ou emprises unitaires 27
- 5.4. Résultats 28
- 5.5. Variantes 30

1. Objet :

La présente note propose un ensemble d'estimations, sur la base des concepts de stockage géologique présentés par l'Andra dans son Dossier stockage 2005, des volumes utiles de stockage associés aux différentes catégories de déchets concernés, en tenant compte des choix possibles de gestion des combustibles irradiés. Il s'agit notamment de prendre en compte l'influence du critère thermique pour le dimensionnement du stockage, et de montrer en quoi ce paramètre remet en cause les comparaisons basées sur les seuls volumes des colis de déchets.

2. Contraintes méthodologiques :

Ces estimations reposent dans un premier temps sur une série d'évaluations des volumes unitaires de colis primaire, de surcolisage éventuel, de galerie ouvragée, ainsi que des emprises au sol correspondantes, toutes menées à partir des caractéristiques techniques décrites par l'Andra. Dans un second temps, ces volumes et surfaces unitaires sont utilisés pour calculer à des fins de comparaison les volumes et surfaces engendrés selon les choix de gestion du combustible irradié.

Les difficultés méthodologiques associées à cette approche sont de deux ordres :

- D'une part, les calculs unitaires sont tributaires de nombreuses options techniques relatives au stockage, depuis son architecture jusqu'au choix des colis. Certaines d'entre elles, comme la présence ou non d'une barrière ouvragée pour les galeries de stockage de déchets vitrifiés, apparaissent encore en discussion alors qu'elles ont un impact potentiel très significatif sur les calculs visés. Plus largement, l'ensemble des hypothèses retenues reste soumis à validation dans le cadre de la procédure d'autorisation d'un éventuel futur stockage.
- D'autre part, les comparaisons des volumes finaux associés à différentes solutions de gestion dépendent pour une large part d'hypothèses techniques et industrielles relatives aux solutions mises en place. En particulier, des hypothèses reposant sur les efforts les plus récents de minimisation des volumes de déchets avant conditionnement ne rendent pas correctement compte des réalités de volumes accumulés avant la mise en place de ces nouvelles techniques.

La présente note détaille systématiquement les hypothèses de l'Andra et les estimations tirées des chiffres de l'industrie auxquelles elle se réfère, en précisant chaque fois que c'est nécessaire les correctifs ou les hypothèses alternatives introduits.

3. Hypothèses sur le stockage de l'Andra :

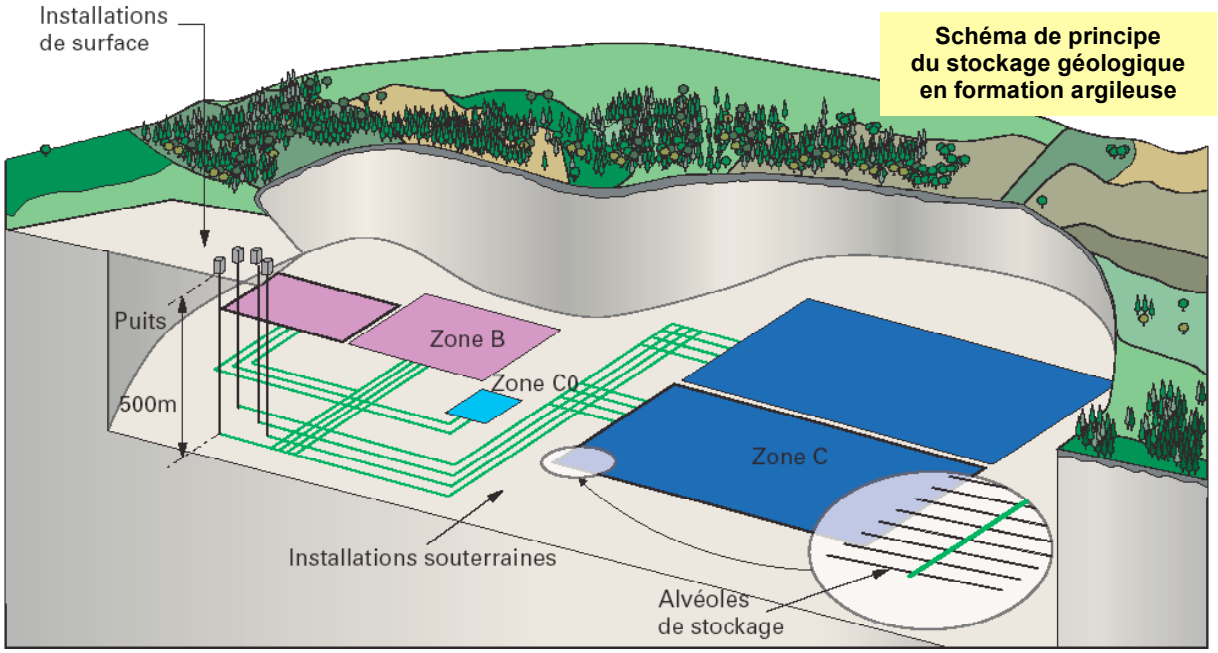
On décrit ici les hypothèses développées par l'Andra pour son évaluation de la faisabilité et de la gestion d'un stockage géologique, telles qu'elle les a détaillées dans son « dossier 2005 » dans le cadre du bilan de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs et de la préparation de la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.

3.1. Concept de stockage de l'Andra :

La figure 1 présente schématiquement le concept développé par l'Andra pour le stockage en formation argileuse, correspondant au type de structure géologique étudié par le laboratoire souterrain de Bure. Compte-tenu de l'absence, malgré le dispositif prévu par la loi de 1991, de second laboratoire consacré à l'étude des milieux granitiques, il semble pertinent d'utiliser ce concept comme base des estimations de volume en stockage géologique des différents déchets concernés.

Il s'agit d'un concept de stockage sur un seul niveau, à une profondeur de 500 m environ, en tunnels horizontaux, avec des galeries de type différent pour les déchets haute activité (HA, déchets vitrifiés, dits aussi déchets C), les déchets moyenne activité à vie longue (MA-VL, également dits déchets B), et les combustibles usés (dits CU, dont le stockage éventuel n'est envisagé que dans l'hypothèse d'un arrêt du retraitement). Une représentation schématique de ce concept de stockage est donnée dans la figure 1, dans l'hypothèse (que nous ne discutons pas à ce stade) du seul stockage de déchets B et C.

Fig. 1 **Concept Andra de stockage géologique des déchets radioactifs :**
représentation schématisée du stockage de déchets haute activité et moyenne à vie longue



Source : Dossier stockage géologique Andra 2005

3.2. Déchets pris en compte par l'Andra :

L'Andra établit une classification, en fonction de leur niveau d'activité (MA-VL et HA-VL), de leur type de conditionnement et de leur caractéristiques physico-chimiques, des déchets pris en considération pour le projet de stockage géologique. L'Andra considère comme option centrale l'hypothèse d'un retraitement de tout le combustible irradié, mais étudie aussi la possibilité d'un arrêt du retraitement, conduisant au stockage direct du combustible irradié. On liste ci-dessous le détail et les principales caractéristiques des déchets pris en compte.

Déchets MA-VL :

1) Les déchets d'activation des structures de réacteurs :

B1 colis CDS-C (colis standard de déchets compactés) de déchets activés en réacteur ;

2) Les boues de traitement d'effluents liquides bitumées, qui proviennent du retraitement : d'une part les fûts en acier d'enrobés bitumineux produits par la STEL à Marcoule (mise en service en 1966) et par STE3 à La Hague (mise en service en 1989) ; d'autre part le conditionnement en fûts acier d'enrobés bitumineux des boues produites par STE2 à La Hague entre 1966 et 1990, entreposées en silos. L'Andra considère ainsi pour ces boues deux groupes de colis :

B2.1 fûts primaires en acier inoxydable de 238 litres (STE3/STE2) [**B2.1a**] et fûts primaires de 245 litres (STEL à partir d'octobre 1996) [**B2.1b**] ;

B2.2 fûts en acier inoxydable de 428 litres (dits surfûts EIP) pour le reconditionnement des fûts primaires en acier non allié produits par la STEL entre 1966 et octobre 1996.

3) Les déchets technologiques cimentés ou compactés. Cet ensemble regroupe tous les déchets technologiques issus du fonctionnement et de la maintenance des installations Areva NC et CEA. L'Andra distingue neuf sous-ensembles :

B3.1.1 conteneurs en béton de 1 000 litres CEA (déchets pulvérulents divers dans une matrice ciment-bitume), parfois reconditionnés en conteneurs métalliques acier. Ce conditionnement concerne un nombre très faible de colis (90) ;

B3.1.2 conteneurs de déchets technologiques ou pulvérulents de La Hague, cimentés. Conditionnés en conteneurs amiante-ciment (CAC) entre 1990 et 1994, et depuis 1994 en conteneurs béton-fibres CBF-C'2 de géométrie identique ;

B3.1.3 conteneurs en béton de 1 800 litres CEA (déchets divers dans une matrice ciment-bitume ou dans un mortier), dont 75 % reconditionnés en conteneurs métalliques acier (volume de 3 200 ou 3 800 litres). Ce conditionnement concerne un nombre très faible de colis (180, produits entre 1964 et 1987) ;

B3.2.1 conteneurs en béton de 500 litres CEA regroupant des fûts de concentrats d'évaporation (production arrêtée) ou de boues de filtration (production en cours) ;

B3.2.2 conteneurs CBF-C'2 de déchets solides et boues de futures installations CEA (Cedra, Agate) ;

B3.3.1 conteneurs CSD-C de déchets technologiques alpha compactés, provenant des usines de fabrication de MOX et de retraitement. Le compactage se fait à l'atelier ACC de La Hague, mis en service en 2002 ;

B3.3.2 fûts inox EIP de déchets pulvérulents de Marcoule (déchets de traitement des eaux de piscine et âmes graphite du combustible issus de l'usine de retraitement), cimentés ;

B3.3.3 conteneurs inox 500 litres CEA de déchets solides moyennement irradiants, conditionnés en ciment-bitume jusqu'en 1990 puis en liant hydraulique. Les conteneurs étaient en acier non allié jusqu'en 1994 ;

B3.3.4 conteneurs acier 870 litres CEA de déchets solides alpha, conditionnés en ciment-bitume jusqu'en 1990 puis en liant hydraulique.

4) Les déchets de structure cimentés ou compactés (éléments de structure des combustibles retraités) produits à La Hague :

B4 fûts inox 1 800 litres de coques et embouts cimentés, produits entre 1990 et 1995 et correspondant aux combustibles REP ;

B5.1 colis CSD-C de coques et embouts des combustibles REP actuels, compactés, produits par l'Atelier de compactage des coques (ACC) mis en service en 2002, incorporant des déchets technologiques à la fois métalliques et organiques ;

B5.2 colis CSD-C identiques, mais avec des déchets technologiques purement métalliques ;

B5.3 colis CSD-C de coques et embouts compactés des anciens combustibles REP, produits par l'ACC, sans mélange avec des déchets technologiques ;

B5.4 colis CSD-C de coques et embouts compactés des anciens combustibles UNGG, produits par l'ACC, sans mélange avec des déchets technologiques.

5) Les déchets de structure et déchets technologiques mis en fûts à Marcoule :

B6.1 conteneurs inox AVM de déchets d'exploitation de l'Atelier de vitrification de Marcoule (AVM) ;

B6.2 fûts inox EIP de déchets de structure des combustibles retraités à UP1 (aluminium et acier) ;

B6.3 fûts inox EIP de déchets de structure des combustibles retraités à UP1 (alliages magnésium) ;

B6.4 fûts inox EIP de déchets technologiques divers (métalliques et organiques) des installations du site de Marcoule ;

B6.5 fûts inox EIP de déchets technologiques divers (purement métalliques) des installations du site de Marcoule.

6) Les déchets constitués par des sources, soit de crayons sources issus des réacteurs REP, soit de sources industrielles. On distingue :

B7.1 colis CSD-C pour les crayons sources cisaillés et compactés (le total envisagé est de 4 colis) ;

B7.2 colis dits « blocs sources » résultant du conditionnement entre 1972 et 1985, par le CEA, de plusieurs milliers de sources industrielles dans des conteneurs en béton placés dans des surconteneurs acier ;

B7.3 fûts EIP de sources cimentées pour les déchets de sources scellées à usage industriel pas encore conditionnées présentant des caractéristiques MA-VL.

7) Déchets au radium et à l'américium, principalement de trois types :

B8.1 fûts métalliques reconditionnés en fûts inox EIP de sulfates de plomb radifères issus du traitement de minerai d'uranium dans l'usine du Bouchet ;

B8.2 fût EIP d'objets au radium à usage médical (ORUM), tous conditionnables dans un seul fût ;

B8.3 conteneurs acier 1 800 l de paratonnerres au radium, compactés et cimentés.

Déchets HA-VL (verres) :

1) Les productions de verre anciennes, comprenant :

C0.1 colis PIVER, produits dans l'installation PIVER à Marcoule entre 1969 et 1981, qui proviennent essentiellement de combustibles UNGG dits Sicral, et pour partie de combustibles RNR de Phénix, correspondant à quatre modèles de conteneurs inox de différentes hauteurs ;

C0.2 colis CSD-V pour verres U-Mo correspondant au futur conditionnement des solutions molybdiques issues de combustibles UNGG retraités à UP2-400 ;

C0.3 conteneurs AVM de déchets vitrifiés pour l'ensemble des verres produits depuis 1978 par l'Atelier de vitrification de Marcoule (AVM), provenant principalement de combustibles UNGG retraités à UP1.

2) Les productions de verre actuelles : colis CSD-V de verres issus du retraitement des combustibles REP actuels. Dans son étude l'Andra module la composition du verre par rapport à la part de combustibles UOX et URE (avec trois variantes pour l'UOX selon le taux de combustion : UOX1 à 33 GW.j/t, UOX2 ou URE à 45 GW.j/t, et UOX3 à 55 GW.j/t). L'Andra étudie également une variante de conditionnement de verres un peu plus concentrés en produits de fission (donc d'une puissance thermique légèrement supérieure), et les productions de verre selon des évolutions futures possibles (retraitement de MOX, incorporation de plutonium dans les verres) :

C1 colis CSD-V actuels d'UOX2 et d'URE ;

C2 colis CSD-V actuels d'UOX2 et d'URE avec concentration accrue des verres ;

C3 colis CSD-V futurs d'UOX et MOX, contenant une solution de produits de fission issué à 15 % de MOX et à 85 % d'UOX2 ;

C4 colis CSD-V futurs marqués Pu, issus du retraitement d'UOX mais incorporant 1 % de plutonium (soit 4 kg par colis en moyenne).

Combustibles usés :

L'Andra étudie également les assemblages combustibles en tant que tels comme déchets ou « colis primaires ». Les combustibles irradiés pris en compte par l'Andra sont des combustibles issus du parc de REP ainsi que des combustibles issus de filières arrêtées et de réacteurs de recherche (UNGG, EL4), des combustibles issus des activités de la défense nationale :

CU1 assemblages combustibles REP UOX2, URE et UOX3 (voir plus haut les hypothèses de taux de combustion), en version courte (AFA-2GE, pour les réacteurs 900 MWe) ou longue (AFA-2LE, pour les réacteurs 1 300 MWe et 1 450 MWe) ;

CU2 assemblages combustibles REP MOX (avec un taux de combustion de 48 GW.j/t, en assemblages courts AFA-2GE) ;

CU3.1 combustibles usés UNGG (15 tonnes) [**CU3.1a**] et EL4 (50 tonnes) [**CU3.1b**] actuellement conditionnés en étuis cylindriques ;

CU3.2 combustibles usés Célestin (militaire) ;

CU3.3 combustibles usés de la propulsion nucléaire (militaire).

On peut noter que les combustibles RNR de Superphénix (un cœur non irradié et un cœur irradié) ainsi que de Phénix (un cœur à décharger à partir de 2008) ne sont pas intégrés à cet inventaire des combustibles usés stockés en l'état. Ils ne sont pas non plus intégrés dans l'inventaire des combustibles retraités sous les hypothèses des scénarios étudiés par l'Andra.

Le tableau 1 récapitule l'ensemble des catégories de colis primaires associées aux activités de recherche, de fabrication et de traitement du combustible nucléaire pris en compte par l'Andra pour le stockage géologique des déchets MA-VL et HA-VL. La figure 1 donne une représentation, à une même échelle, de l'essentiel des colisages primaires correspondant (hors assemblages combustibles).

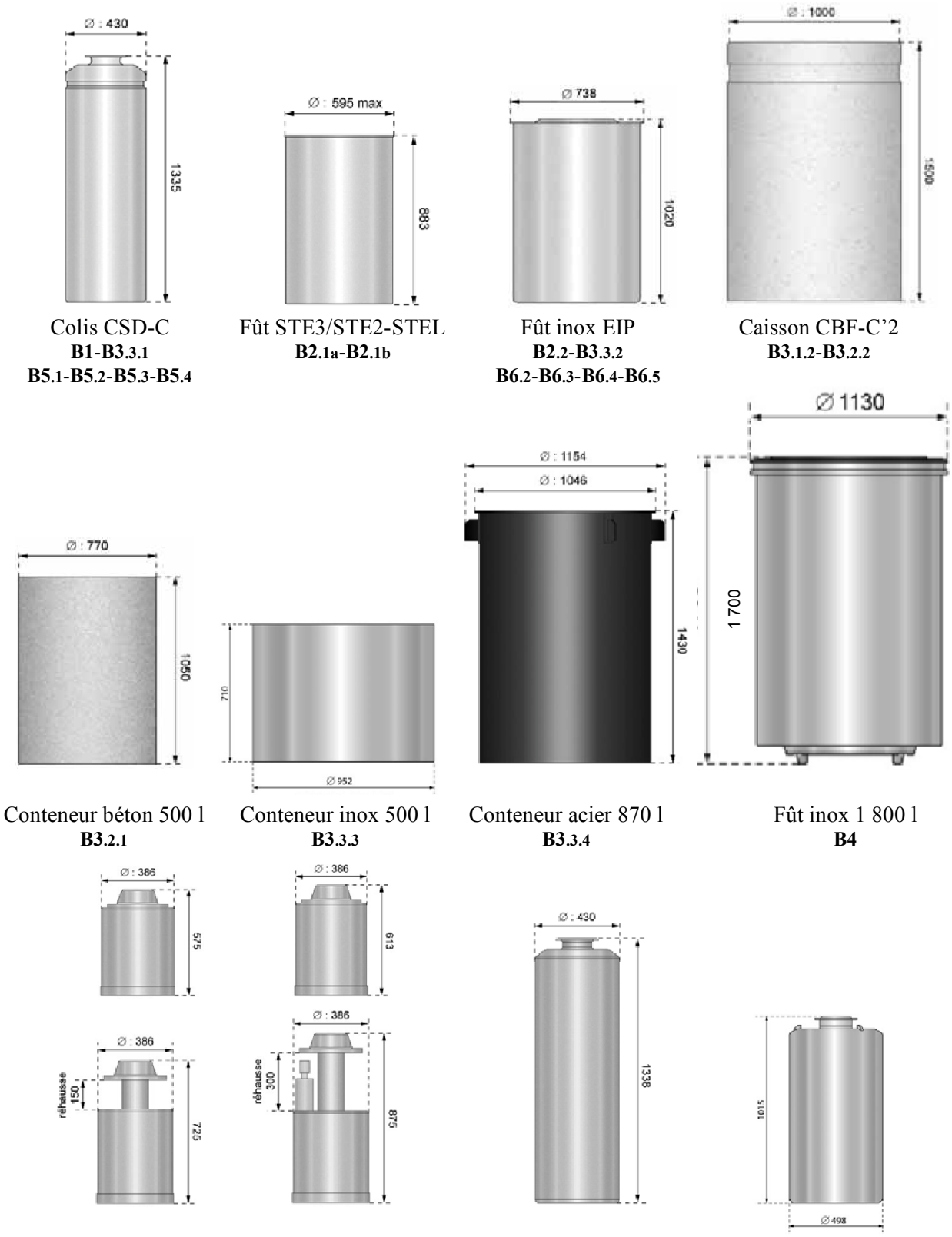
Tab. 1 **Déchets MA-VL et HA-VL pris en considération pour le stockage géologique**[a]

Code	Nom	Vol. (litres)	Masse (kg) déchet	Masse (kg) total	Statut / retrait.[b]
Déchets activés (MA-VL)					
B1	CSD-C déchets réacteurs EDF	180	400	510	Non
Déchets bitumés (MA-VL)					
B2.1a	Fût inox STE3/STE2 La Hague	238	220	240	Actuel
B2.1b	Fût inox STEL Marcoule	245	220	240	Passé
B2.2	Fût inos EIP STEL Marcoule	428	240	330	Passé
Déchets technologiques cimentés et compactés (MA-VL)					
B3.1.1	Conteneur béton 1 000 l CEA	1 000	n.d.	3 200	Non
B3.1.2	CBF-C'2 La Hague (auparavant CAC)	1 200	n.d.	1 500-3 000	Actuel
B3.1.3	Conteneur béton 1 800 l CEA	1 800	n.d.	2 700-6 800	Non
B3.2.1	Conteneur béton 500 l CEA	500	n.d.	770-920	Non
B3.2.2	CBF-C'2 CEA	1 200	n.d.	n.d.	Non
B3.3.1	CSD-C déchets technologiques alpha (Areva)	180	n.d.	635	Actuel
B3.3.2	Fût inox EIP déchets pulvérulents Marcoule	428	n.d.	720	Passé
B3.3.3	Conteneur inox 500 l CEA (auparavant acier)	500	n.d.	850-925	Non
B3.3.4	Conteneur acier 870 l CEA	870	n.d.	1 600-2 300	Non
Déchets de structure cimentés (MA-VL)					
B4	Fût inox 1 800 l coques et embouts La Hague	1 800	776	3 500	Passé
Déchets de structure (et technos) compactés (MA-VL)					
B5.1	CSD-C coques et embouts REP + technos M et O	180	420	520	Actuel
B5.2	CSD-C coques et embouts REP + technos M	180	420	520	Actuel
B5.3	CSD-C coques et embouts REP anciens	180	n.d.	725	Passé
B5.4	CSD-C déchets structure UNGG	180	n.d.	350	Passé
Déchets de structure et technos en fûts (MA-VL)					
B6.1	Conteneur AVM déchets technos Marcoule	180	160	320[c]	Passé
B6.2	Fût inox EIP déchets structure Marcoule (Al et Fe)	428	n.d.	< 300[c]	Passé
B6.3	Fût inox EIP déchets structure Marcoule (Mg)	428	n.d.	< 300[c]	Passé
B6.4	Fût inox EIP déchets technos Marcoule M et O	428	n.d.	240[c]	Passé
B6.5	Fût inox EIP déchets technos Marcoule M	428	n.d.	240[c]	Passé
Déchets vitrifiés (HA-VL)					
C0.1	Colis PIVER (4 types)	39-45	20-120	(moy.) 90	Passé
C0.2	CSD-V UMo La Hague	180	400	n.d.	Passé
C0.3	Conteneur AVM déchets vitrifiés Marcoule	n.d.	360	410	Passé
C1	CSD-V UOX/URE La Hague thermique actuelle	180	400	n.d.	Actuel
C2	CSD-V UOX/URE La Hague thermique future	180	400	n.d.	Futur
C3	CSD-V UOX+MOX La Hague	180	400	n.d.	Futur
C4	CSD-V UOX+Pu La Hague	180	400	n.d.	Futur
Combustibles usés (HA-VL)					
CU1	Combustible usé REP UOX/URE	189-223	665-775	665-775	Actuel
CU2	Combustible usé REP MOX	189	660	660	Actuel
CU3.1a	Etui cylindrique combustible usé UNGG	4,0-8,7	9-18	n.d.	Passé
CU3.1b	Etui cylindrique combustible usé EL4	8,6	≥ 10,6	n.d.	Passé
CU3.2	Etui cylindrique combustible usé Célestin	100	n.d.	n.d.	Non
CU3.3	Combustible usé propulsion nucléaire	n.d.	n.d.	n.d.	Non

a. Hors déchets MA-VL constitués par des sources et déchets MA-VL au radium ou à l'américium.
b. Lien de chaque catégorie de déchets (indépendamment de son état par rapport à son conditionnement final) avec la gestion des combustibles du parc de production électronucléaire.
c. Hors matériau d'immobilisation des déchets.

Source : WISE-Paris d'après Dossier stockage géologique Andra 2005

Fig. 2 **Colis de déchets MA-VL et HA-VL pris en considération pour le stockage géologique**[a,b]



a. Hors combustibles usés ; hors déchets MA-VL constitués par des sources et déchets MA-VL au radium ou à l'américium.

b. Les déchets en conteneur béton 1 000 l (**B3.1.1**) et en conteneur béton 1 800 l (**B3.1.3**) du CEA, en raison de leur très petit nombre, ne sont pas représentés. La majorité a été reconditionnée en conteneurs aciers semblables au conteneur 870 l présenté.

Source : WISE-Paris d'après Dossier stockage géologique Andra 2005

3.3. Colisage final des déchets prévu par l'Andra :

Chacun des colis primaires détaillés précédemment fait l'objet d'un surcolisage en vue de son stockage géologique. L'Andra examine pour chaque famille plusieurs options possibles. On présente ici les concepts de surcolisage retenus par l'Andra dans son dossier 2005. Le tableau 2 propose pour les différents colis de stockage une estimation de volume et de masse rapportés aux colis primaires.

Pour les déchets B (MA-VL), l'option retenue est un conteneur parallépipédique en béton pouvant regrouper jusqu'à 4 colis primaires par colis de stockage. La géométrie externe du colis de stockage est standardisée (figure 3). Deux possibilités (standard et variante) sont retenues pour la constitution de ce colis de stockage standard. Leurs dimensions et leur poids sont similaires. Différentes tailles sont prévues pour les différents types de colis primaires, dans des limites de 2,5 mètres en largeur et en hauteur et de 3 mètres en longueur. Selon les hypothèses de l'Andra :

- plus de 80 % des colis de stockage ont une longueur et une hauteur comprises entre 1,5 et 2,1 mètres, et contiennent tous quatre colis primaires,
- moins de 20 % des colis de stockage, de dimensions plus importantes, ont une longueur comprise entre 2,5 et 2,9 mètres et une hauteur comprise entre 1,7 et 2,4 mètres, et contiennent selon les cas un, deux ou quatre colis primaires.

Pour les déchets C (colis vitrifiés, HA-VL), l'option retenue est un surconteneur cylindrique individuel en acier non allié de 55 mm d'épaisseur (figure 4). Deux colis aux dimensions standardisées permettent de couvrir l'ensemble des déchets C, eux-mêmes conditionnés soit en conteneurs PIVER, soit en conteneurs AVM, soit en CSD-V :

- colis court (Ø 655 mm, longueur 1 291 mm) pour les déchets **C0.1** (PIVER) et **C0.3** (AVM) ;
- colis long (Ø 590 mm, longueur 1 607 mm) pour les déchets **C0.2** (anciens déchets La Hague) et **C1** à **C4** (actuels et futures déchets La Hague).

Pour les combustibles usés REP (HA-VL), l'option retenue est un surconteneur cylindrique recevant quatre assemblages pour les combustibles UOX et URE (figure 5), et un surconteneur cylindrique semblable à ceux des déchets C, recevant un seul assemblage MOX (figure 6). Un surconteneur cylindrique polyvalent est enfin étudié pour les autres combustibles (UNGG, EL4, etc.) :

- colis de quatre assemblages pour les **CU1** (UOX et URE), avec 110 mm d'épaisseur d'acier non allié et plusieurs variantes de longueur pour s'adapter aux assemblages courts ou longs et recevoir les assemblages nus ou en étuis (Ø 1 255 mm, longueur 4 500 mm à 5 400 mm) ;
- colis d'un assemblage pour le **CU2** (MOX), avec 120 mm d'épaisseur d'acier non allié et deux variantes, une pour assemblage nu et l'autre pour assemblage en étui (Ø 620 mm, longueur respectivement 4 500 mm et 5 400 mm). Ce colis peut aussi recevoir un assemblage UOX dont la réactivité serait supérieure à celle du combustible standard ;
- colis analogue aux colis AVM pour les autres combustibles, revevant cinq ou dix étuis pour le **CU3.1** (UNGG), un seul étui pour les combustibles **CU3.2** (EL4) ou **CU3.3** (Célestins).

Tab. 2 **Colis de stockage MA-VL et HA-VL pris en considération pour le stockage géologique**

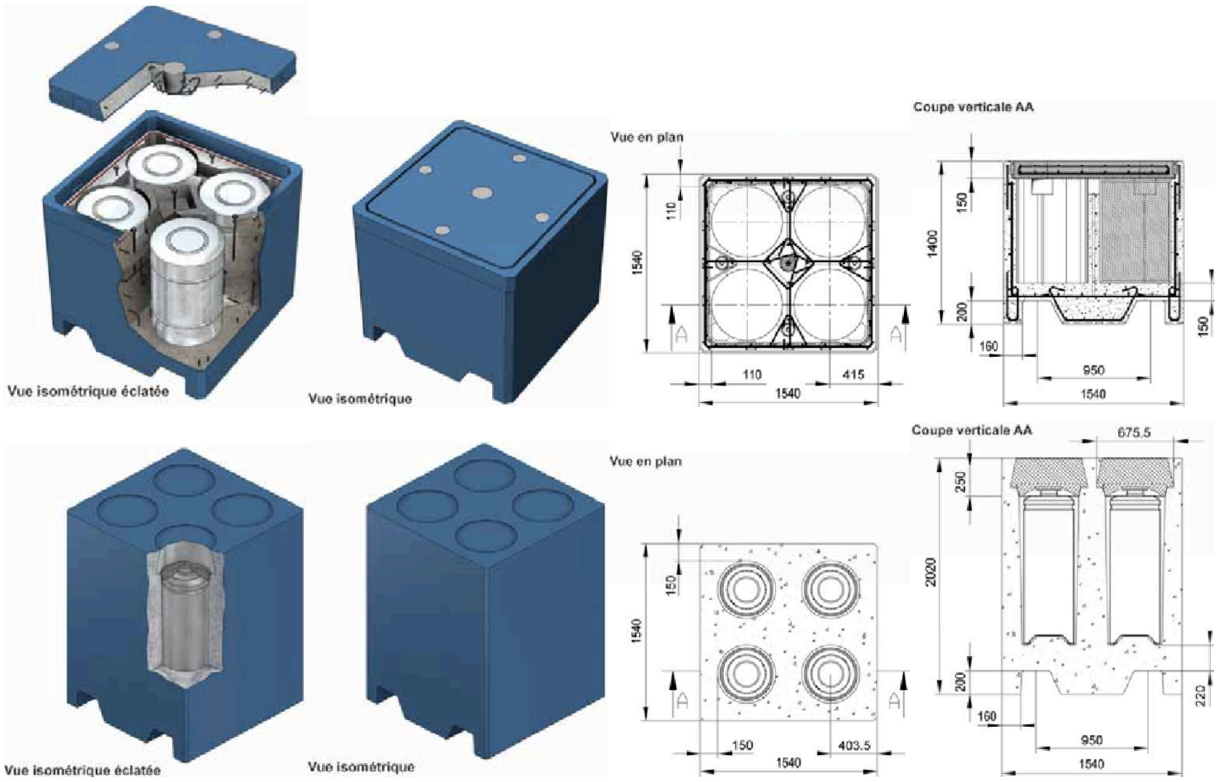
		Volume (m^3)			Masse (t)		
Modèle de surconteneur	**Déchets concernés**	**Prim.**	**Stock.**	**Ratio**[a]	**Prim.**	**Stock.**	**Ratio**[a]
Déchets B							
Cube béton déchets B	Tous **B**	< 1,8	< 17,4	x 3,7[b]	< 6,8	< 25	n.d.
Déchets C							
Court (PIVER, AVM)	**C0.1-C0.3**	0,180	0,435	x 2,4	0,410	1,645	x 4,0
Long (CSD-C)	**C0.2-C1-C2-C3-C4**	0,180	0,439	x 2,4	~0,450	1,965	x 4,7
Combustibles usés							
4 assemblages UOX/URE	**CU1**	~0,200	5,6-6,7	x 7,5	6,6-7,7	35-43	x 1,3
1 assemblage MOX	**CU2**	0,189	1,4-1,6	x 7,9	6,6	8-10	x 1,4
Anciens combustibles	**CU3.1-CU3.2-CU3.3**	~0,008	0,435	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

a. On indique ici un ratio moyen, qui peut varier selon les caractèristiques précises des colis pris en compte.

b. On utilise comme valeur moyenne un ratio sur les volumes tiré des bilans globaux calculés par l'Andra. WISE-Paris a estimé le ratio du volume de déchet de stockage pour 1 m^3 de déchets primaires à 3,39 m^3 pour des fûts STEL, et 6,65 m^3 pour des conteneurs CSD-C.

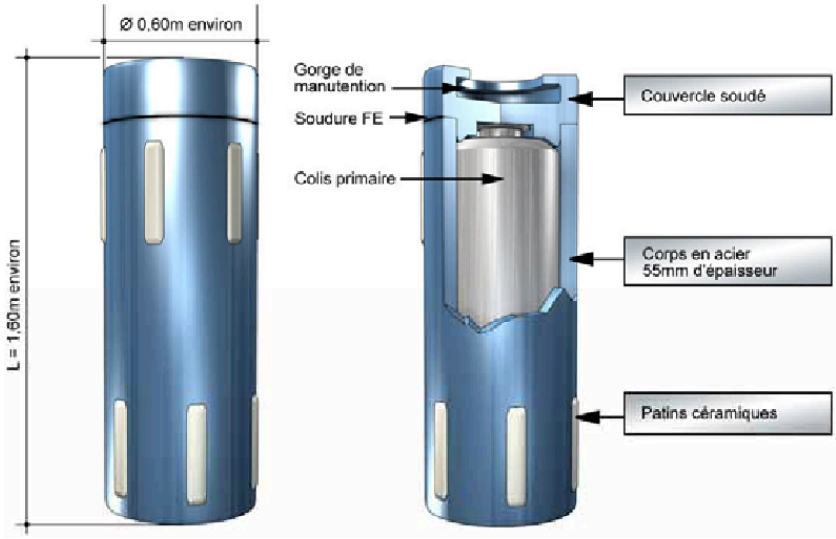
Source : WISE-Paris d'après Dossier stockage géologique Andra 2005

Fig. 3 **Colis de stockage pour déchets B (MA-VL) en vue de leur stockage géologique**



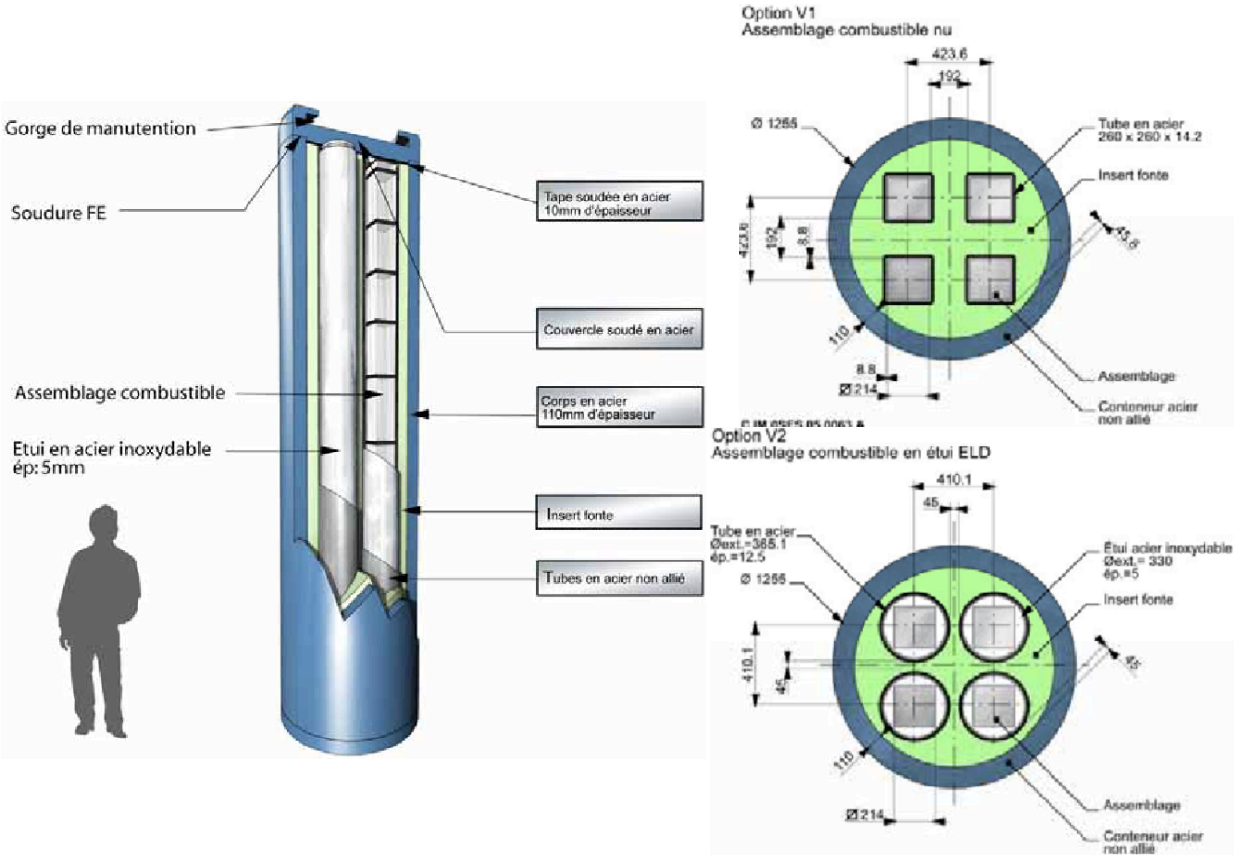
Source : Dossier stockage géologique Andra 2005

Fig. 4 **Colis de stockage pour déchets C (HA-VL) en vue de leur stockage géologique**



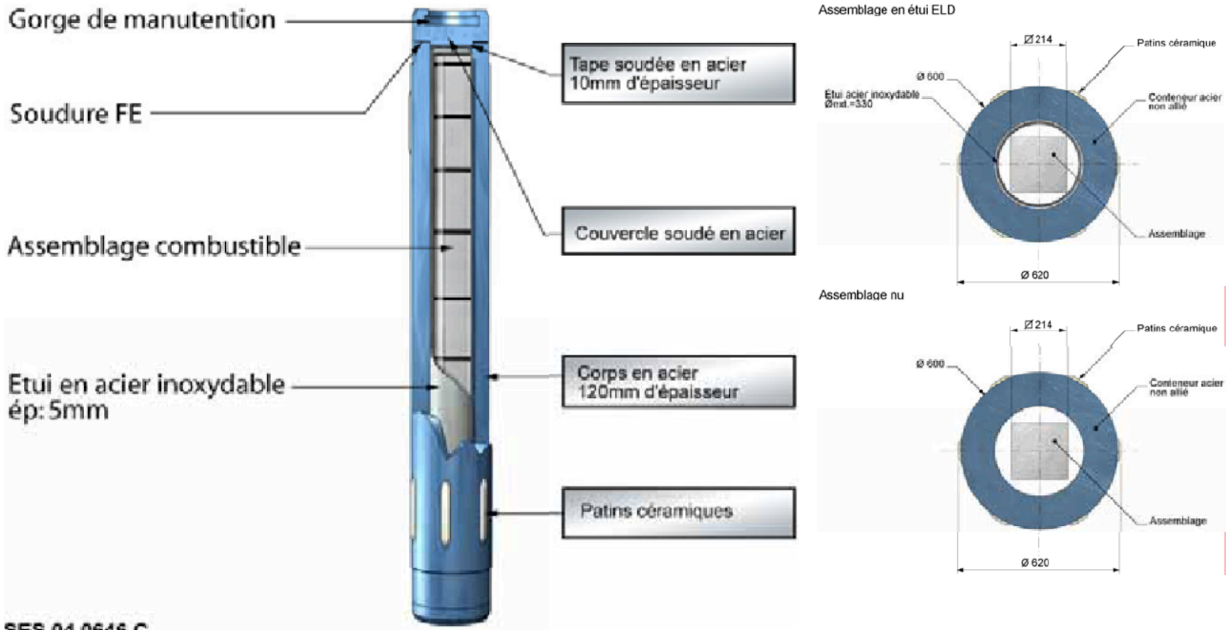
Source : Dossier stockage géologique Andra 2005

Fig. 5 **Colis de stockage pour combustibles usés (UOX/URE) en vue de leur stockage géologique**



Source : Dossier stockage géologique Andra 2005

Fig. 6 **Colis de stockage pour combustibles usés (MOX) en vue de leur stockage géologique**



Source : Dossier stockage géologique Andra 2005

3.4. Concepts de galeries de stockage :

Les hypothèses sur les colis de stockage conduisent au choix et au dimensionnement de concepts d'alvéoles de stockage. On présente ici les concepts retenus par l'Andra dans son dossier 2005. Pour chacun, le tableau 3 propose une estimation du volume de galerie rapporté aux colis de stockage.

L'alvéole prévue pour les déchets B est un tunnel borgne subhorizontal en béton, pseudo-cylindrique, d'une longueur utile de 250 m et d'un diamètre excavé compris entre 10 et 12 m (figure 8). La longueur totale comprend 270 m de galerie et 50 m de bouchon, d'un diamètre inférieur (7 à 8 m). L'intérieur de la galerie est aménagé en chambre de section carrée pouvant recevoir les empilements de colis de stockage de déchets B, cubiques. Sa hauteur est comprise entre 5,90 m et 7,40 m, et sa largeur entre 4,90 m et 6,70 m (figure 9). Les colis sont selon leur taille empilés sur 3 à 4 niveaux dans la hauteur, et en 2 à 4 colonnes dans la largeur (avec des jeux de 10 cm entre colonnes, et de 15 cm entre le haut des colis et le plafond, que l'on néglige dans la suite de la présente estimation). Au total, l'Andra identifie 10 modèles différents d'alvéoles, par exemple :

- 4 colonnes x 4 niveaux (6,1 m de haut et 6,7 m de large) pour colis **B2.1** ;
- 3 colonnes x 4 niveaux (7,0 m de haut et 6,1 m de large) pour colis **B2.2**, **B6.1**, **B6.2**, **B6.3**, **B3.3.2** ;
- 3 colonnes x 3 niveaux (6,3 m de haut et 5,4 m de large) pour colis **B1**, **B5.2**, **B5.3**, **B5.4** ;
- 2 colonnes x 3 niveaux (5,9 m de haut et 6,1 m de large) pour colis **B3.3.4**.

L'alvéole prévue pour les déchets C est un tunnel horizontal borgne, sans barrière ouvragée argileuse, d'une longueur utile de 30 m, avec un bouchon de 8 m (longueur totale 40 m environ), le tout pour un diamètre excavé de 0,7 m (figure 10). Le nombre de colis par alvéole dépend de la thermique, c'est-à-dire du type et de l'âge des colis (figure 11). L'Andra prévoit, pour des entreposages avant stockage de 20 ans pour les **C0**, 60 ans pour les **C1** et **C2**, et 70 ans pour les **C3** et **C4** :

- 18 colis (0 m espacement) par alvéole pour les colis **C0.2** (anciens verres La Hague) ;
- 22 colis (0 m espacement) par alvéole pour les colis **C0.1** et **C0.3** (verres PIVER et AVM) ;
- 8 colis (2,5 m espacement) par alvéole pour les colis **C1** (verres actuels La Hague) ;
- 7 colis (3 m espacement) par alvéole pour les colis **C2** et **C3** (futurs verres La Hague) ;
- 6 colis (4 m espacement) pour les colis **C4** (futurs verres La Hague).

L'alvéole prévue pour les combustibles usés est un tunnel horizontal borgne, avec une barrière ouvragée, d'une longueur totale de 43 à 45 m, dont une longueur utile de 32 m et un bouchon de 10 m (figure 12). Son diamètre excavé est de 3,3 m environ pour les combustibles **CU1** (UOX/URE), et de 2,6 m pour les combustibles **CU2** (MOX). L'Andra distingue trois situations de remplissage pour les **CU1** court et **CU1** long après 60 ans d'enreposage, et les **CU2** après 90 ans (figure 13) :

- 3 colis (8 m espacement, total 42,8 m) pour colis **CU1** (UOX/URE) longs (AFA-2LE) ;
- 4 colis (4,5 m espacement, total 42,8 m) pour colis **CU1** (UOX/URE) courts (AFA-2GE) ;
- 3 colis (10,5 m espacement, total 45,3 m) pour colis **CU2** (MOX).

Pour les colis **CU3**, l'Andra prévoit une alvéole sans barrière ouvragée comme pour les déchets C.

Tab. 3 **Volume d'ouvrage (alvéoles) pour le stockage géologique de déchets MA-VL et HA-VL**

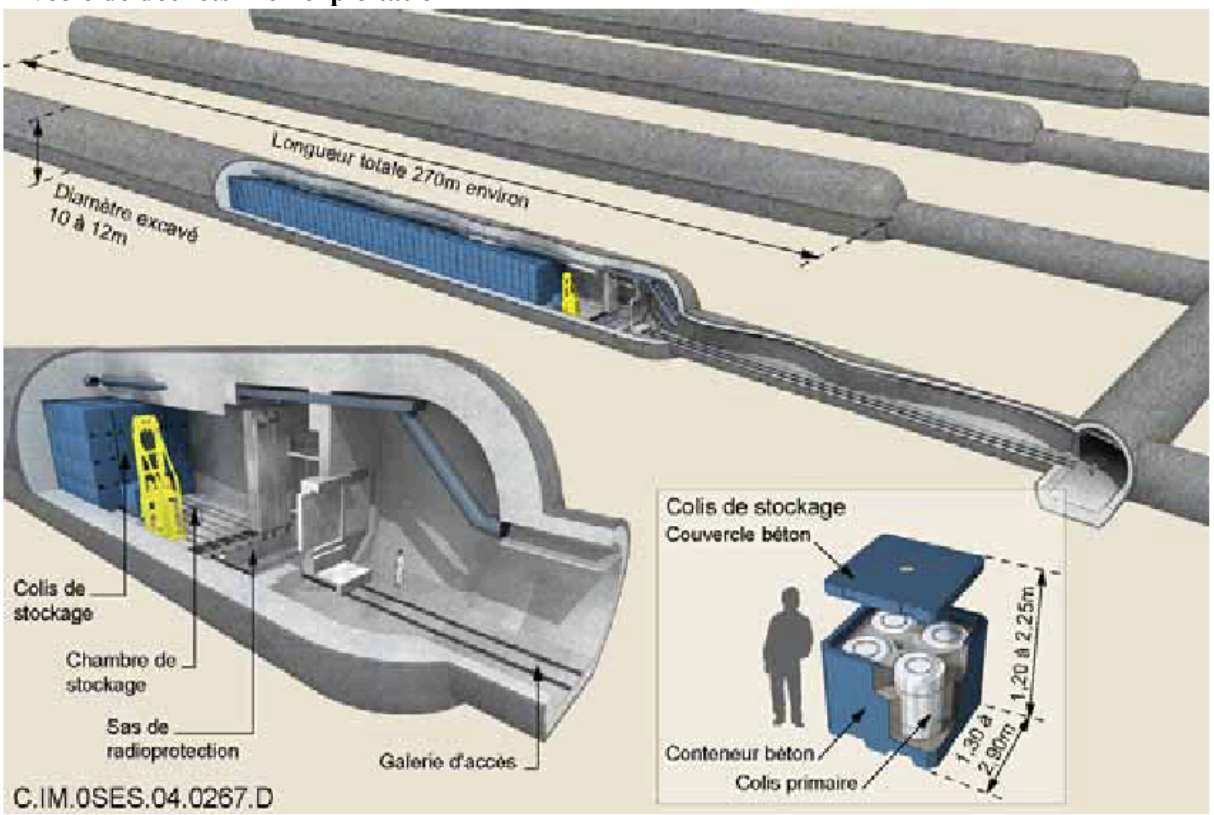
Alvéole	Déchets concernés	Volume colis (m^3) Nb	Vol.	Total	Volume total alvéole (m^3) Galerie	Bouchon	Total	Ratio
Déchets B								
Moyenne	Tous **B**			9 600[a]	21 200-30 500	1 900-2 500	23 100-33 000	x 2,4-3,4
Déchets C								
Anciens	**C0**	18-22	0,44	7,9-9,7	12,3	3,1	15,4	x 1,6-1,9
Actuels	**C1**	8	0,44	3,5	12,3	3,1	15,4	x 4,4
Futurs	**C2-C3**	7	0,44	3,1	12,3	3,1	15,4	x 5,0
Futurs	**C4**	6	0,44	2,6	12,3	3,1	15,4	x 5,8
Combustibles usés								
UOX/URE (long)	**CU1**	3	6,7	20,1	280	86	366	x 18,2
UOX/URE (court)	**CU1**	4	5,6	22,4	280	86	366	x 16,3
MOX	**CU2**	3	1,5	4,5	187	53	240	x 53,3

a. Valeur moyenne estimée pour les principales variantes de remplissage de galeries de déchets MA-VL.

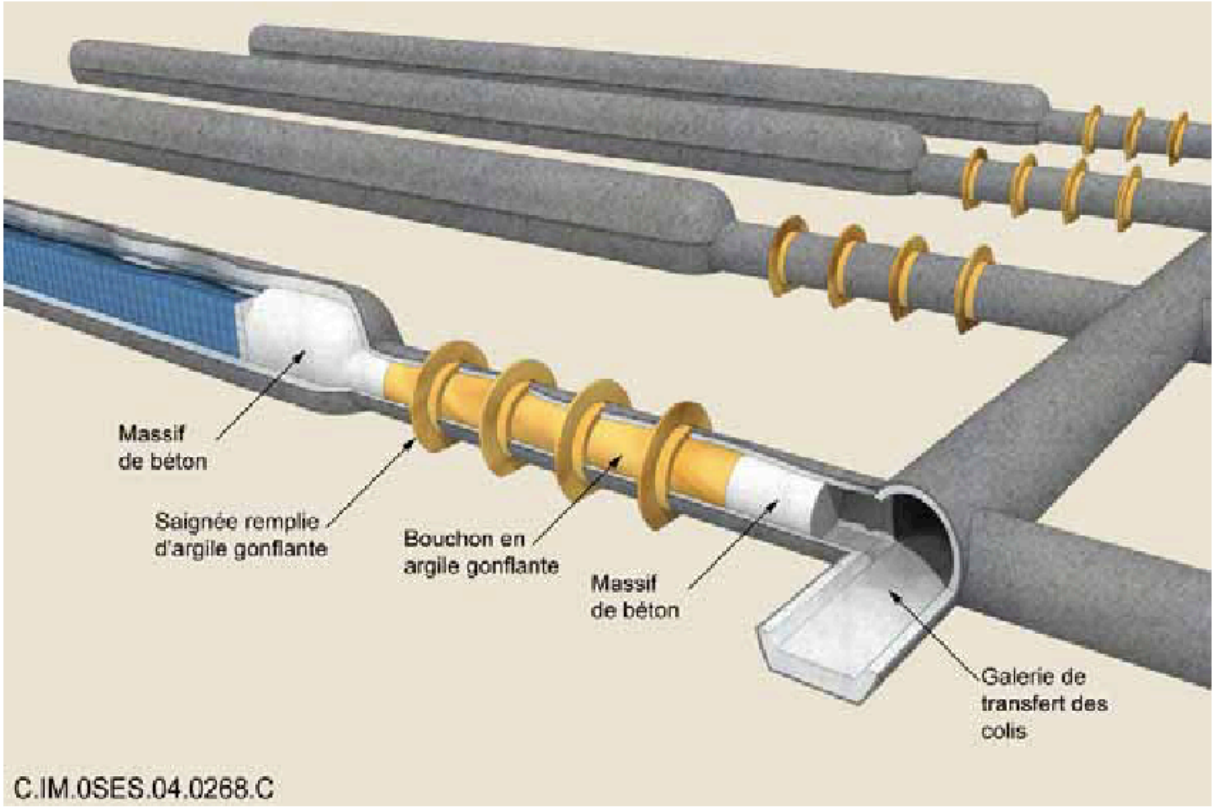
Source : WISE-Paris d'après Dossier stockage géologique Andra 2005

Fig. 8 **Concept d'alvéole de stockage pour le stockage géologique de déchets B (MA-VL)**

Alvéole de déchets B en exploitation



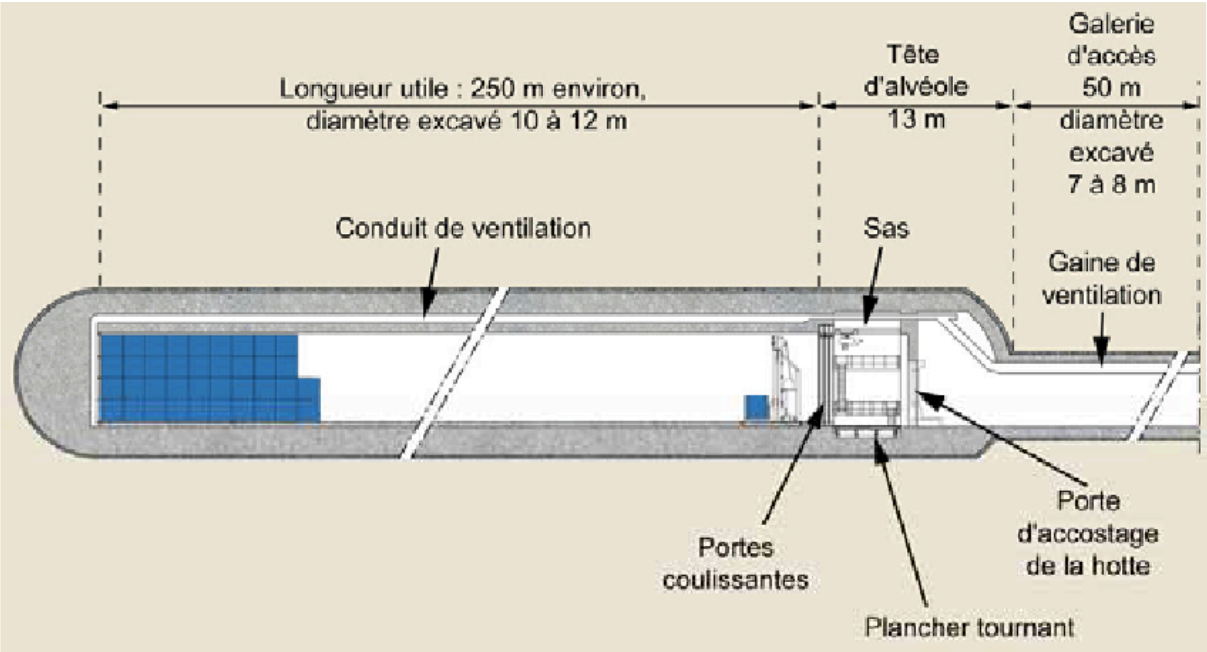
Alvéole de déchets B scellée



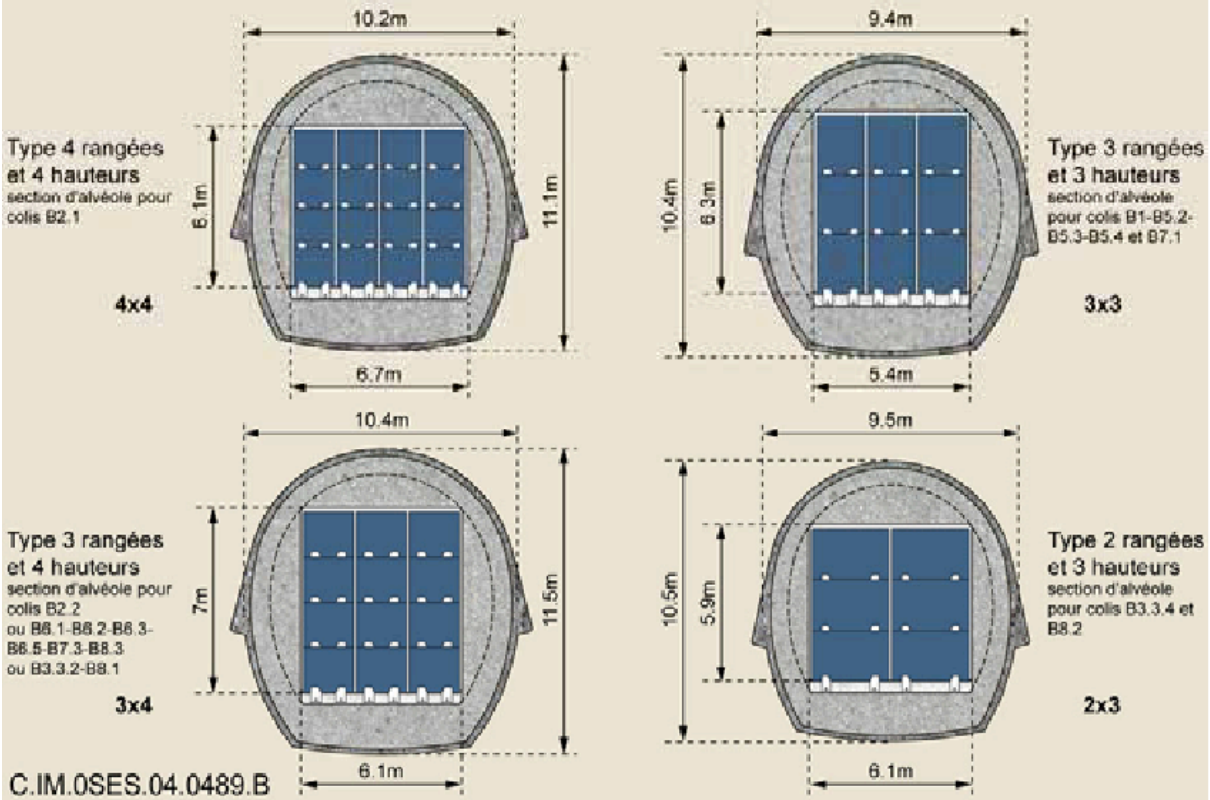
Source : Dossier stockage géologique Andra 2005

Fig. 9 **Coupes d'une alvéole de stockage pour le stockage géologique de déchets B (MA-VL)**

Coupe longitudinale



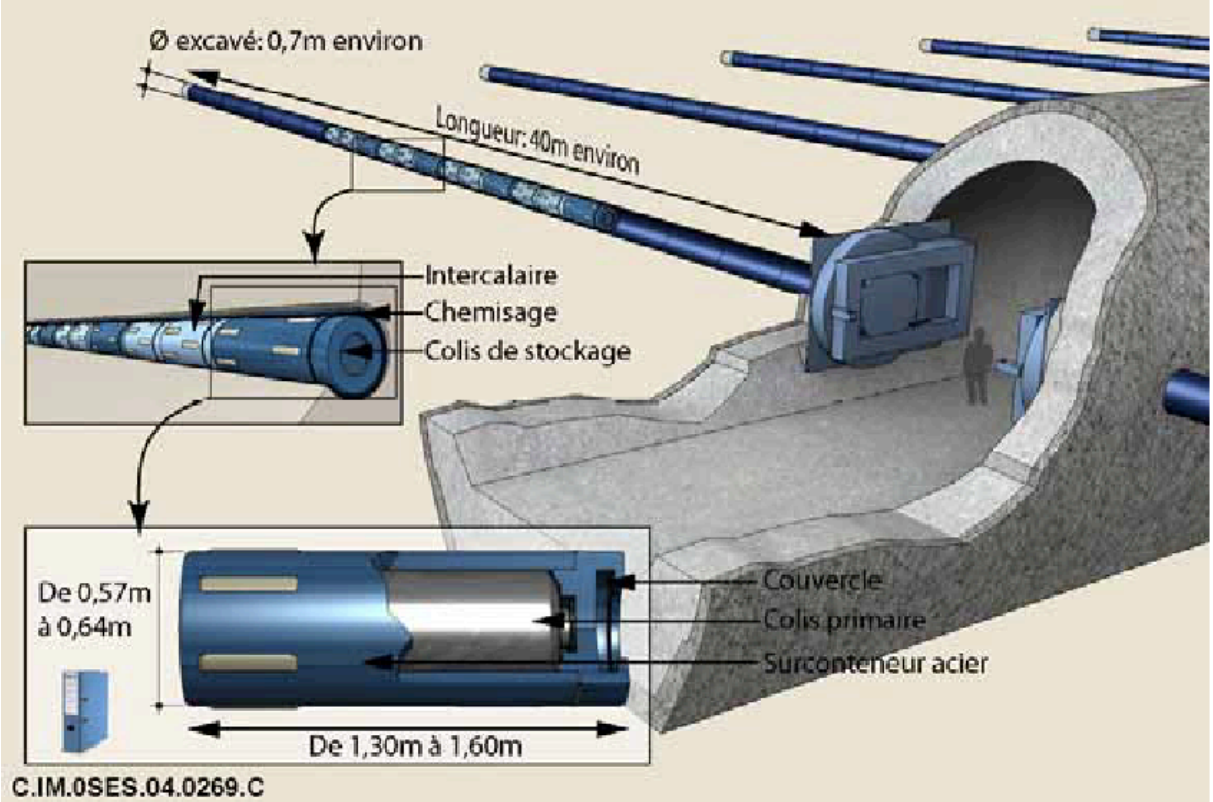
Coupe transversale - Exemples de remplissage



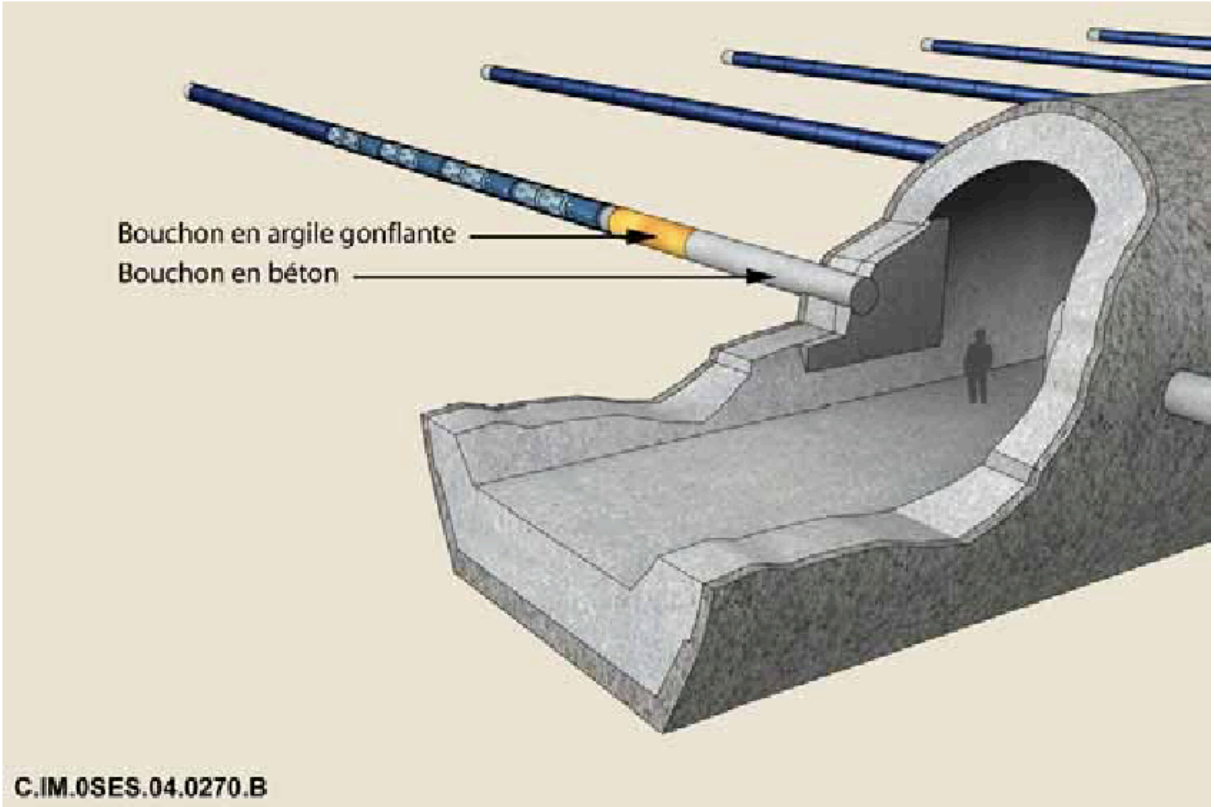
Source : Dossier stockage géologique Andra 2005

Fig. 10 **Concept d'alvéole de stockage pour le stockage géologique de déchets C (HA-VL)**

Alvéole de déchets C en exploitation



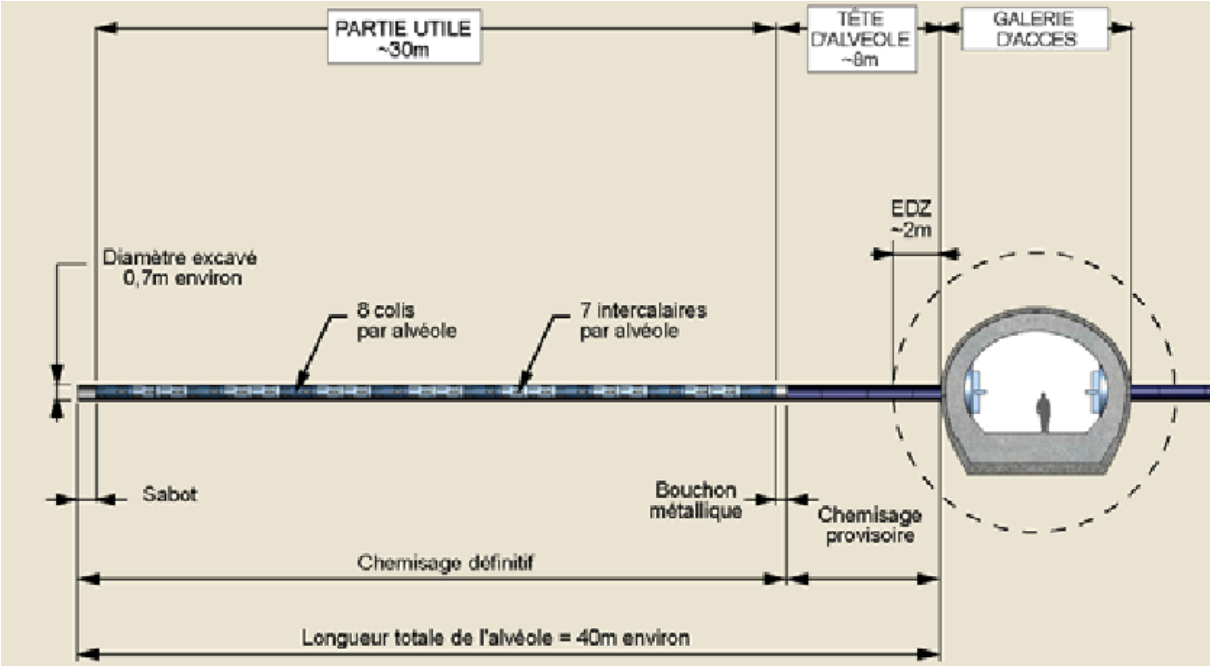
Alvéole de déchets C scellée



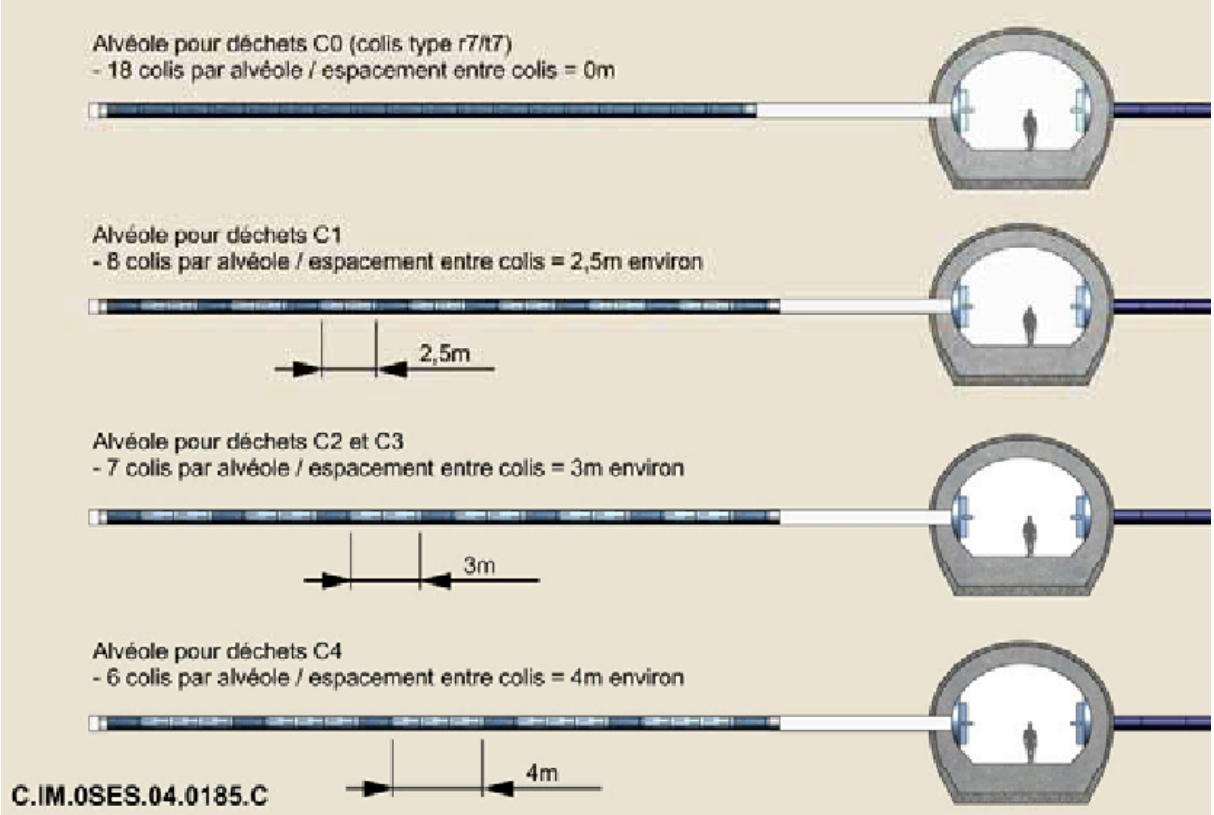
Source : Dossier stockage géologique Andra 2005

Fig. 11 **Coupes d'une alvéole de stockage pour le stockage géologique de déchets C (HA-VL)**

Coupe longitudinale



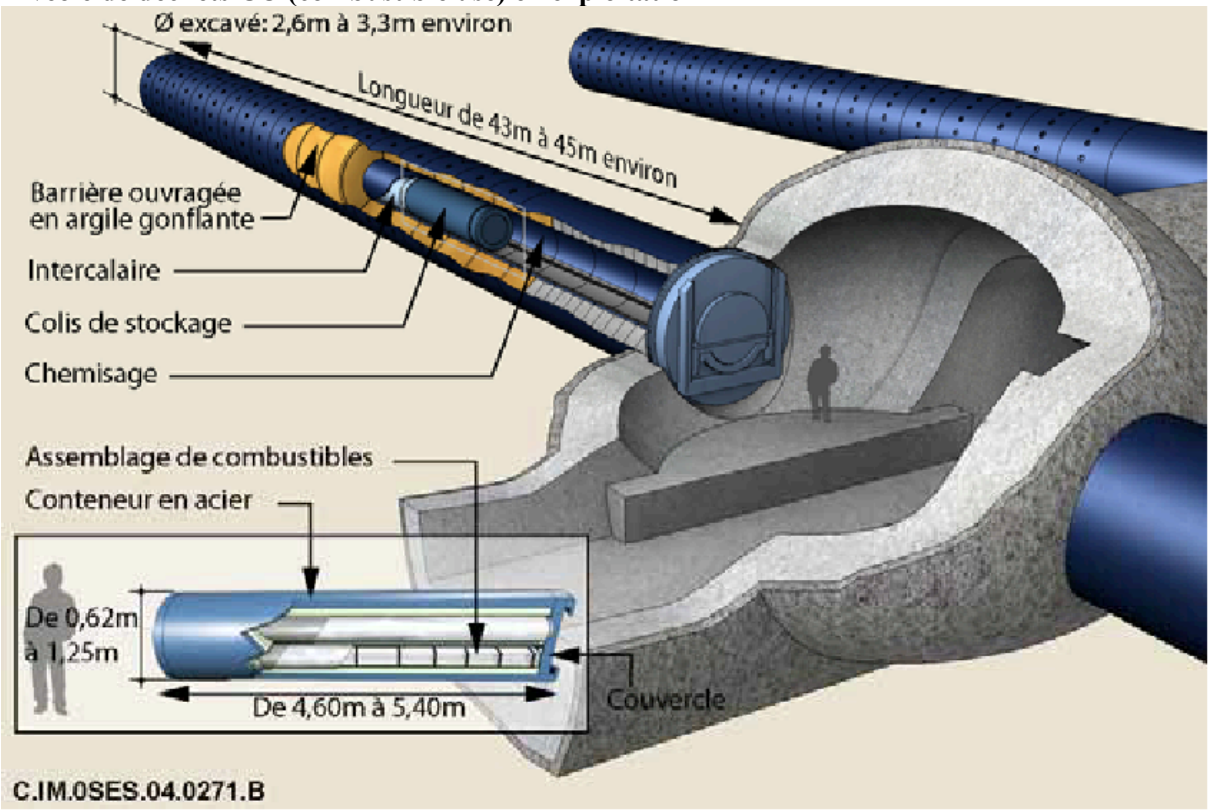
Exemples de remplissage



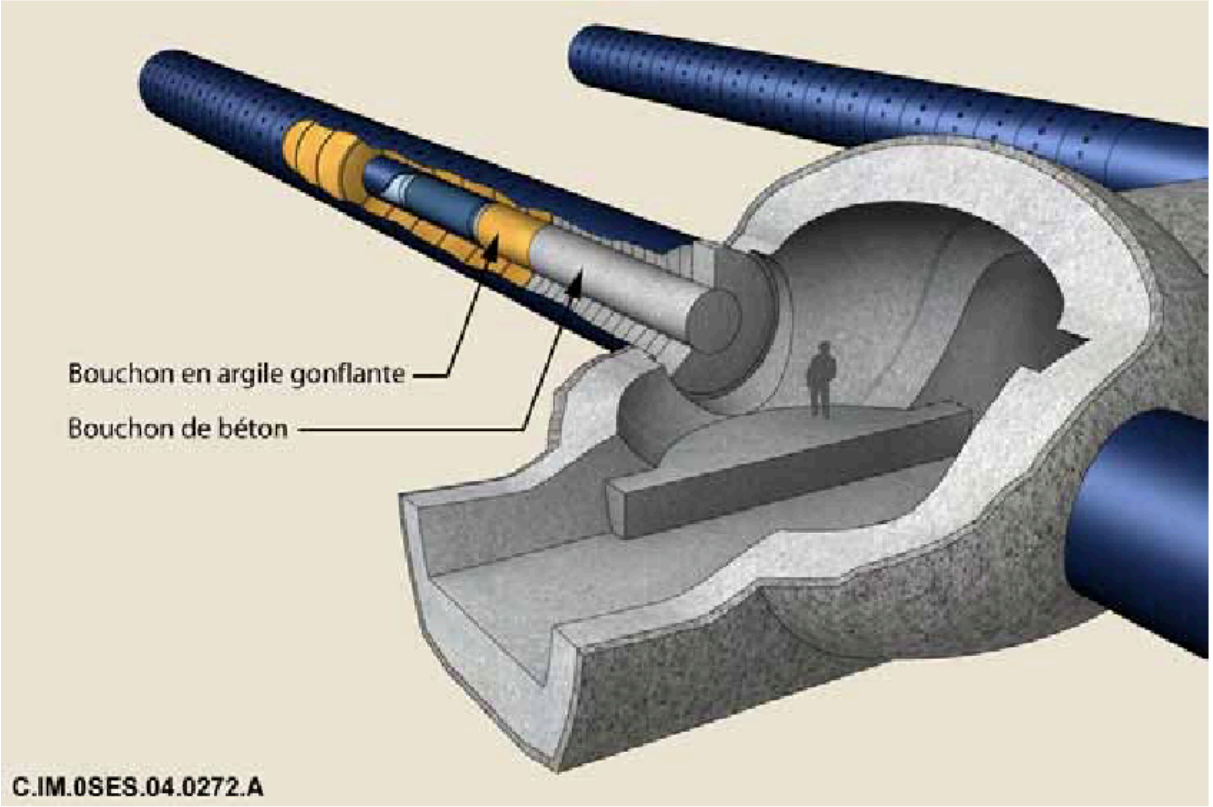
Source : Dossier stockage géologique Andra 2005

Fig. 12 Concept d'alvéole de stockage pour le stockage géologique de combustibles usés (HA-VL)

Alvéole de déchets CU (combustible usé) en exploitation



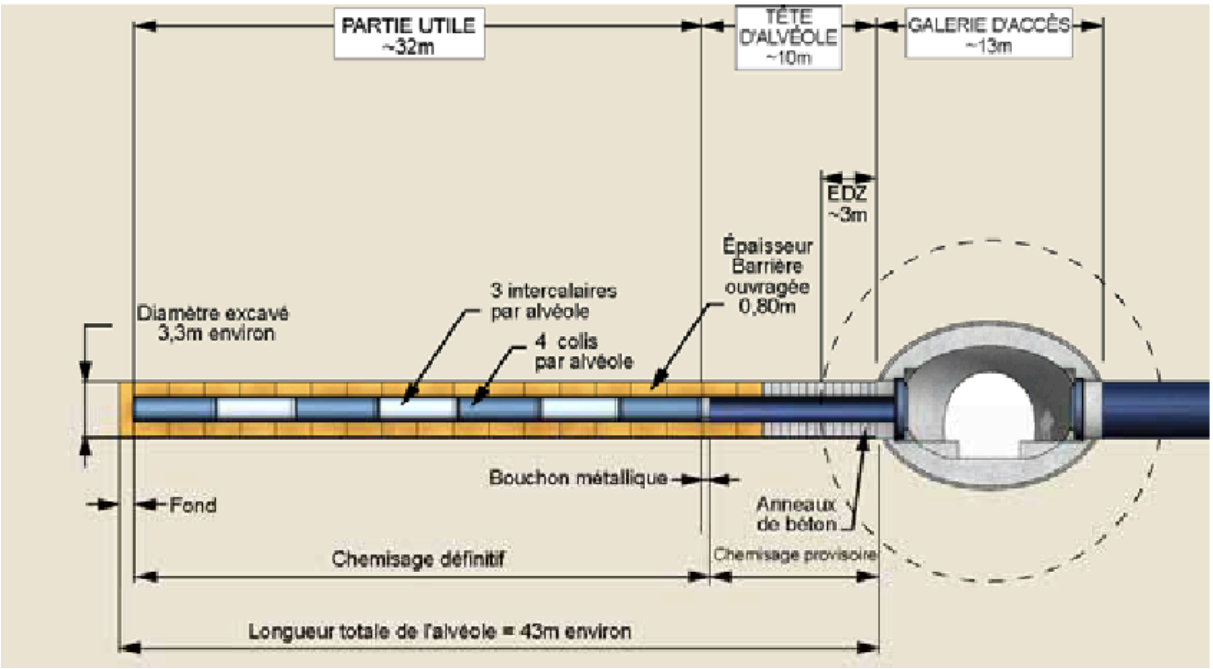
Alvéole de déchets CU (combustible usé) scellée



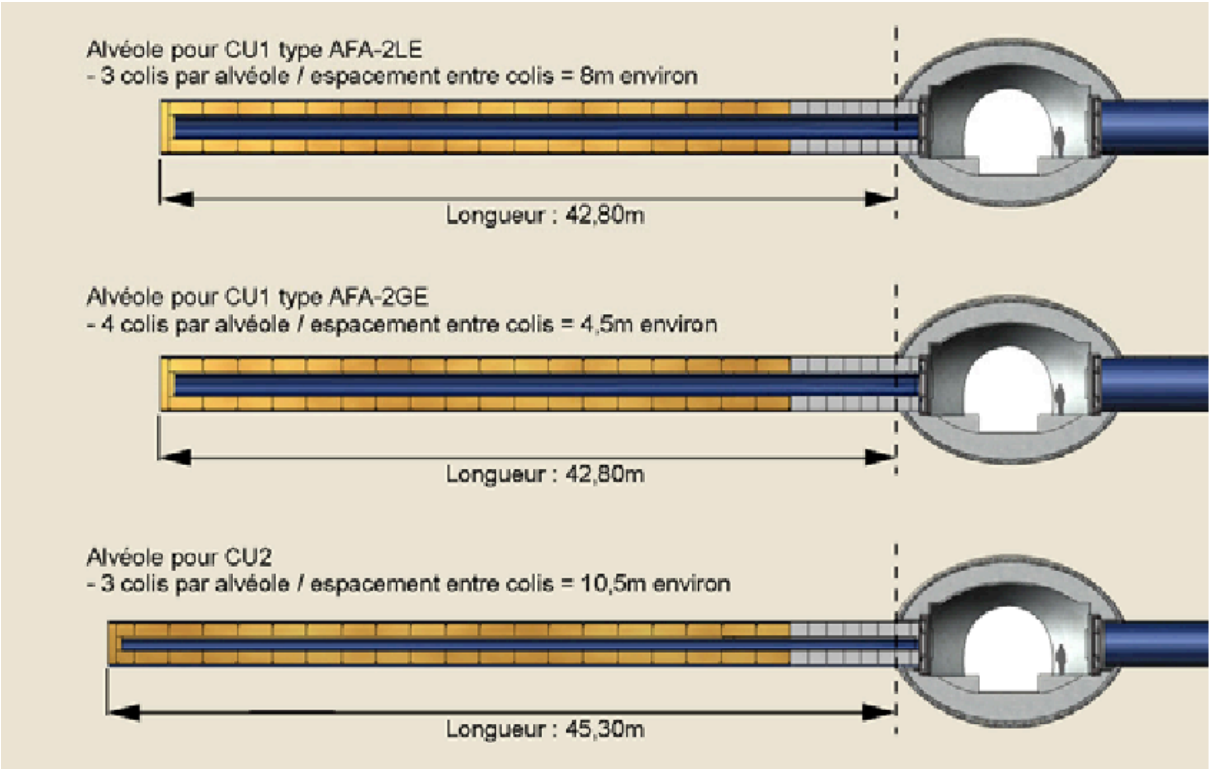
Source : Dossier stockage géologique Andra 2005

Fig. 13 **Coupes d'une alvéole de stockage pour le stockage géologique de combustibles usés (HA-VL)**

Coupe longitudinale



Exemples de remplissage



Source : Dossier stockage géologique Andra 2005

4. Projections de l'Andra :

L'Andra réalise, sur la base des hypothèses de conception décrites ci-dessus, des projections sur le volume de stockage. Différents scénarios de gestion du combustible permettent d'abord d'estimer le nombre de colis des différentes catégories à prendre en compte ; ce nombre de colis est ensuite converti en estimations de volume, mais aussi d'emprise au sol du stockage géologique.

4.1. Scénarios pris en compte par l'Andra :

Le dimensionnement du stockage retenu pour les études de faisabilité et de sûreté est basé sur un ensemble de scénarios concernant la gestion du combustible irradié issu du parc actuel de réacteurs. Le combustible irradié et/ou les déchets associés à l'exploitation éventuelle d'un nouveau parc de réacteurs remplaçant le parc actuel ne sont pas pris en compte dans le dimensionnement – bien que les hypothèses centrales des scénarios de tout retraitement impliquent que ce parc futur existe pour réutiliser les matières issues du retraitement. Les scénarios pris en compte sont :

• *S1 : poursuite du retraitement*

Les quantités de combustible irradié issues du parc nucléaire actuel sur l'ensemble de sa durée de vie atteignent 45 000 tML de combustible, comprenant du combustible UOX (uranium), URE (uranium de retraitement réenrichi) et MOX (mélange d'uranium et du plutonium séparé). Le taux de combustion ayant une grande influence sur le dégagement thermique des combustibles usés, qui est prépondérant pour le dimensionnement du stockage, l'Andra répartit les combustibles UOX usés en trois grands groupes correspondants à l'évolution des taux de combustion moyen (UOX1 pour 33 GW.j/t, UOX2 pour 45 GW.j/t, et UOX3 pour 55 GW.j/t). Les quantités de combustibles prises en compte sont :

- 41 500 tML d'UOX, dont 8 000 tML d'UOX1, 20 500 tML d'UOX2 et 13 000 tML d'UOX3,
- 800 tML d'URE (45 GW.j/t),
- 2 700 tML de MOX (48 GW.j/t).

Trois variantes de ce scénario sont considérées :

- S1a : l'ensemble du combustible est retraité, sans exception. Une partie des colis vitrifiés est supposée recevoir une part accrue de plutonium (hypothèse de retraitement simplifié) ;
- S1b : le combustible MOX, soit 2 700 tML, n'est pas retraité, et la teneur en produits de fission des déchets vitrifiés est augmentée (densification thermique des déchets C) ;
- S1c : le combustible MOX, soit 2 700 tML, n'est pas retraité, mais au contraire de S1b il n'y a pas de densification thermique des déchets C.

• *S2 : arrêt du retraitement en 2010*

L'arrêt du retraitement en 2010 entraîne l'accumulation au cours de la poursuite de l'exploitation du parc nucléaire actuel de 29 000 tML de combustibles usés à stocker. Les quantités considérées par l'Andra tiennent compte de différences dans les flux par rapport au scénario S1, liées à l'arrêt du retraitement : l'utilisation d'UOX3 est plus forte tandis que le recours à l'URE et au MOX diminuent. Le scénario suppose 8 000 tML d'UOX1 et 8 000 tML d'UOX2 retraitées avant 2010. Les quantités de combustibles prises en compte comme devant être stockées sont :

- 26 500 tML d'UOX, dont 12 500 tML d'UOX2 et 14 000 tML d'UOX3,
- 500 tML d'URE (45 GW.j/t),
- 2 000 tML de MOX (48 GW.j/t).

Le tableau 4 présente le bilan, tel que comptabilisé par l'Andra dans chacun de ses scénarios, du nombre de colis de déchets associés à la gestion du combustible irradié, regroupant l'ensemble des déchets générés par le retraitement, passé ou futur, ainsi que les combustibles usés non retraités lorsque les scénarios les prennent en compte. Le tableau indique également, pour chaque catégorie concernée (hors combustible usé), le volume de colis primaire correspondant donné par l'Andra. Il ne s'agit pas d'un inventaire exhaustif des déchets pris en compte pour le stockage géologique : les déchets sont limités aux productions de La Hague et Marcoule, excluant par exemple les déchets similaires produits dans les opérations d'autres sites (CEA notamment), et a fortiori les déchets MA-VL issus d'autres secteurs d'activité.

Tab. 4 **Projections de l'Andra sur le stockage géologique : nombre de colis et volumes de déchets liés à la gestion du combustible usé**

Type		Scénario S1a		Scénario S1b		Scénario S1c		Scénario S2	
		Nb[a]	Vol	Nb[a]	Vol	Nb[a]	Vol	Nb[a]	Vol
Déchets B (MA-VL)									
B2	La Hague	42 000	10 000	42 000	10 000	42 000	10 000	42 000	10 000
	Marcoule	62 990	26 060	62 990	26 060	62 990	26 060	62 990	26 060
	Total B2	***104 990***	***36 060***	***104 990***	***36 060***	***104 990***	***36 060***	***104 990***	***36 060***
	dont **B2.1**	46 930	11 210	46 930	11 210	46 930	11 210	46 930	11 210
	dont **B2.2**	58 060	24 850	58 060	24 850	58 060	24 850	58 060	24 850
B3	La Hague	9 890	10 470	9 890	10 470	9 890	10 470	7 340	7 750
	Marcoule	7 990	3 420	7 990	3 420	7 990	3 420	7 990	3 420
	Total B3	***17 880***	***13 890***	***17 880***	***13 890***	***17 880***	***13 890***	***15 330***	***11 170***
	dont **B3.1.2**	8 690	10 250	8 690	10 250	8 690	10 250	6 440	7 590
	dont **B3.3.1**	1 200	220	1 200	220	1 200	220	900	160
	dont **B3.3.2**	7 990	3 420	7 990	3 420	7 990	3 420	7 990	3 420
B4	La Hague	1 520	2 730	1 520	2 730	1 520	2 730	1 520	2 730
B5	La Hague	42 600	7 790	39 900	7 300	39 900	7 300	13 600	2 490
	dont **B5.1**	7 940	1 450	7 400	1 350	7 400	1 350	2 140	390
	dont **B5.2**	31 760	5 810	29 600	5 420	29 600	5 420	8 560	1 570
	dont **B5.3**	2 500	460	2 500	460	2 500	460	2 500	460
	dont **B5.4**	400	70	400	70	400	70	400	70
B6	Marcoule	10 810	4 580	10 810	4 580	10 810	4 580	10 810	4 580
	dont **B6.1**	180	30	180	30	180	30	180	30
	dont **B6.2**	930	400	930	400	930	400	930	400
	dont **B6.3**	7 550	3 230	7 550	3 230	7 550	3 230	7 550	3 230
	dont **B6.4**	1 200	510	1 200	510	1 200	510	1 200	510
	dont **B6.5**	950	410	950	410	950	410	950	410
Total B La Hague		**95 580**	**30 990**	**93 280**	**30 500**	**93 280**	**30 500**	**64 460**	**22 970**
Total B Marcoule		**81 790**	**34 060**	**81 790**	**34 060**	**81 790**	**34 060**	**81 790**	**34 060**
Total B		**177 370**	**65 050**	**175 070**	**64 560**	**175 070**	**64 560**	**146 250**	**57 030**
Déchets C (HA-VL)									
C0	La Hague (**C0.2**)	800	140	800	140	800	140	800	140
	Marcoule (**C0.3**)	3 140	550	3 140	550	3 140	550	3 140	550
	Total C0	***3 940***	***690***	***3 940***	***690***	***3 940***	***690***	***3 940***	***690***
C1	La Hague	4 640	810	4 640	810	38 350	6 710	4 640	810
C2	La Hague	990	170	27 460	4 810	—	—	5 920	1 040
C3	La Hague	13 320	2 330	—	—	—	—	—	—
C4	La Hague	13 250	2 320	—	—	—	—	—	—
	Total C1 à C4	***32 200***	***5 630***	***32 100***	***5 610***	***38 350***	***6 710***	***10 560***	***1 850***
Total C La Hague		**33 000**	**5 770**	**32 900**	**5 750**	**39 150**	**6 850**	**11 360**	**1 990**
Total C Marcoule		**3 140**	**550**	**3 140**	**550**	**3 140**	**550**	**3 140**	**550**
Total C		**36 140**	**6 320**	**36 040**	**6 300**	**42 290**	**7 400**	**14 500**	**2 540**
Combustibles usés									
CU1	EDF	—	—	—	—	—	—	54 000[b]	n.d.
CU2	EDF	—	—	5 400	n.d.	5 400	n.d.	4 000	n.d.
Total CU		**—**	**—**	**5 400**	**n.d.**	**5 400**	**n.d.**	**58 000**	**n.d.**

a. Nombre de colis primaires de déchets par catégorie. Pour les combustibles irradiés, nombre d'assemblages.
b. Dont 27 200 assemblages « courts » UOX AFA-2GE et 26 800 « longs » UOX AFA-2LE.

Source : WISE-Paris d'après Dossier stockage géologique Andra 2005

Une remarque importante s'impose : ces scénarios que l'Andra compare entre eux portent en réalité sur des enveloppes différentes qui rendent cette comparaison biaisée. Dans S2, l'ensemble des matières produites par le parc actuel qui restent à la fin de son exploitation est pris en compte dans le stockage – indépendamment des choix pour la suite. Dans S1, au contraire, une partie des matières générées par le parc actuel, séparées par retraitement mais non réutilisées dans ce parc, est renvoyée à une solution future sans être prise en compte dans le dimensionnement du stockage. Cette différence est très significative, comme le montrent quelques estimations des ordres de grandeur :

- dans S1, 41 500 tML d'UOX retraitées et 800 tML d'URE retraitées produisent en première approximation 39 700 t d'uranium de retraitement (95 %) et 420 t de plutonium (1 %) ;
- les 800 tML d'URE « consomment », pour réenchissement, environ 6 400 t d'uranium de retraitement (en supposant un ratio de 8 t d'uranium de retraitement pour 1 t d'uranium enrichi) ;
- les 2 700 tML de MOX « consomment » moins de 230 t de plutonium. Cette masse correspondrait au taux moyen de 8,65 % en plutonium, nécessaire selon EDF pour atteindre le taux de combustion de 48 GW.j/t indiqué par l'Andra, mais le taux initial en plutonium du MOX est longtemps resté à 5,25 % puis augmenté récemment à 7,08 %, et le taux de combustion autorisé est de 39 GW.j/t. Le retraitement de ce MOX, prévu dans S1a, génèrerait à nouveau 110 à 130 t de plutonium.

Ainsi, selon l'estimation de WISE-Paris, ce sont de l'ordre de 200 t à 300 t de plutonium séparé (respectivement pour S1b ou c et pour S1a) et plus de 30 000 tonnes d'uranium de retraitement qui restent sans emploi dans le parc actuel et échappent donc au raisonnement sur le dimensionnement du stockage. Réutilisées sous les formes actuelles, ces quantités équivaudraient à 2 300 t à 3 500 t de combustible MOX (davantage si le taux de 8,65 % de plutonium n'est pas atteint) et 3 750 t d'URE.

4.2. Influence de la thermique :

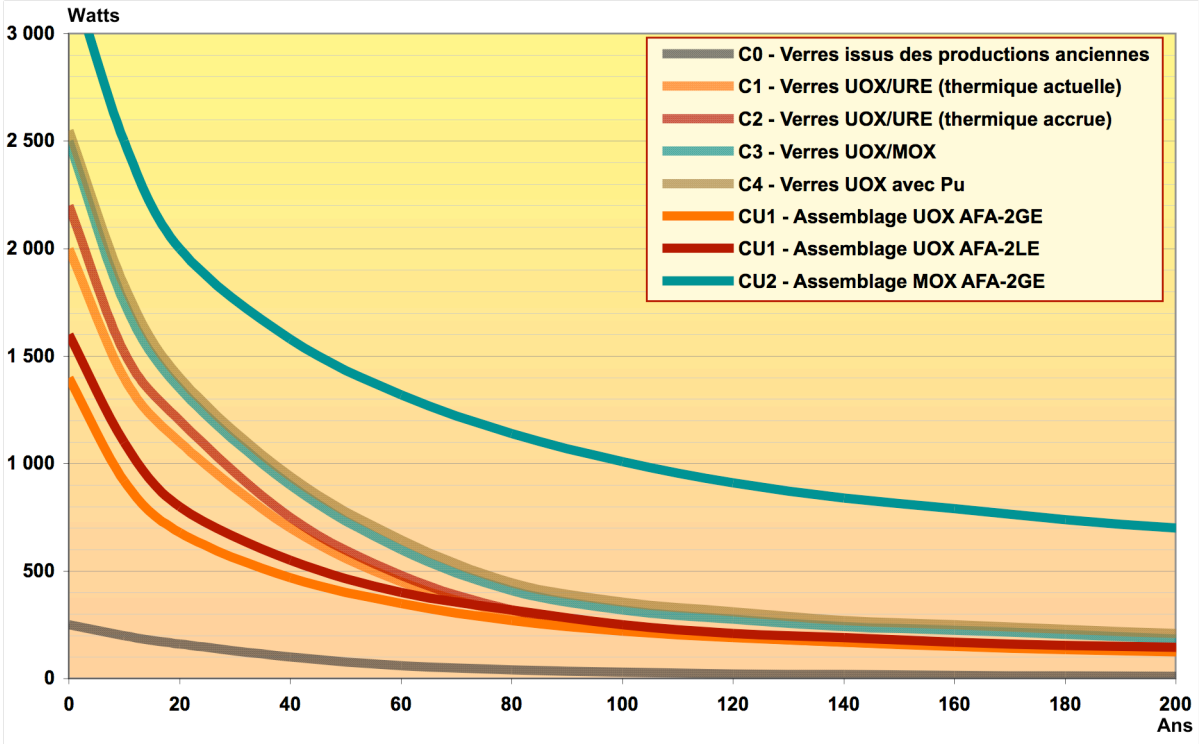
Le dégagement thermique des déchets de haute activité, qu'il s'agisse des déchets vitrifiés ou des combustibles irradiés, est un paramètre déterminant pour le dimensionnement des ouvrages de stockage dédiés à ces déchets. La figure 14 indique, pour les déchets HA-VL pris en compte par l'Andra, l'évolution caractéristique de leur dégagement thermique avec le temps (dégagement par colis vitrifié ou par assemblage). Du fait de la forte diminution de ce dégagement au cours des premières décennies l'Andra prévoit des durées d'entreposage avant stockage de 20 ans pour les déchets **C0** (issus de productions anciennes et de combustibles moins « chauds ») et de 60 ans ou davantage pour tous les autres.

Ces 60 ans correspondent grosso-modo au moment où le dégagement thermique des déchets vitrifiés produits par le retraitement de combustibles UOX (déchets **C1** ou **C2**, ces derniers correspondant à une thermique légèrement accrue) rejoint celui des assemblages combustibles UOX (**CU1**) entreposés en l'état – encore faut-il ajouter dans le premier cas le délai entre le déchargement du combustible et son retraitement, de l'ordre d'une dizaine d'années, voire davantage en pratique. Le dégagement thermique après 60 ans d'entreposage de tous ces déchets est inférieur à 500 W par colis ou par assemblage, soit trois à quatre fois moins qu'à leur production.

Le retraitement du combustible MOX, envisagé dans le scénario S1a de l'Andra, se fait par incorporation d'une fraction réduite de MOX dans des lots de combustible UOX retraité. Les déchets vitrifiés correspondants, dits UOX/MOX (**C3**), ont à la production un dégagement thermique supérieur de 25 % environ supérieur à celui des déchets de verres UOX (**C1** et **C2**). Le même niveau de dégagement serait atteint en cas d'incorporation d'une fraction de 1 % environ de plutonium dans les verres d'UOX (**C4**, correspondant à un processus de retraitement moins poussé qu'aujourd'hui). Pour ces deux types de colis, l'Andra prévoit un entreposage étendu à 70 ans au lieu de 60 ans.

Les assemblages de combustible MOX irradié se distinguent de tous les autres colis HA-VL considérés par un dégagement thermique plus important, mais qui diminue surtout beaucoup plus lentement. Ainsi après 60 ans leur dégagement thermique reste d'environ 1 300 W par assemblage, soit trois fois plus qu'un assemblage UOX ordinaire. Aussi l'Andra prévoit un entreposage prolongé à 90 ans pour le MOX. Après cette période, le dégagement reste toutefois supérieur à 1 000 W par assemblage.

Fig. 14 Dégagement thermique[a] des déchets C et combustibles irradiés (HA-VL)



a. Pour les déchets vitrifiés : en Watts par colis ; pour les combustibles irradiés : en Watts par assemblage.

Source : WISE-Paris d'après Dossier stockage géologique Andra 2005

4.3. Emprise du stockage :

Le dégagement thermique a une forte influence sur le volume global des ouvrages de stockage. Dans le cas du concept de stockage sur un seul niveau de profondeur proposé par l'Andra, cette influence se mesure notamment à travers l'emprise horizontale du stockage. L'Andra fournit différentes indications à ce sujet.

Dans un premier temps, l'Andra fournit des éléments chiffrés sur l'emprise horizontale de chaque type de colis, tenant compte de la géométrie et de la disposition des alvéoles. Ces chiffres sont rassemblés dans le tableau 5, qui les met en relation avec le dégagement thermique des colis à la fin de la durée d'entreposage considérée, et propose une estimation de l'emprise horizontale par alvéole correspondante.

Tab. 5 Emprise horizontale des différentes catégories de déchets HA-VL

	C0.1 C0.3	C0.2	C1	C2	C3	C4	CU1 court	CU1 long	CU2
Age (années d'entreposage)	20	20	60	60	70	70	60	60	90
Dégagement thermique[a] (W)	100	100	500	500	500	500	1 600	1 800	1 100
Emprise									
Par colis de stockage (m^2)	20	25	80	85	103	115	301	385	346
Par alvéole[b] (m^2)	440	450	640	595	749	690	1 204	1 155	1 038

a. Dégagement thermique par colis de stockage, tenant donc compte pour les combustibles irradiés du nombre d'assemblages par colis. Les valeurs données sont des ordres de grandeur.

b. Valeurs calculées par WISE-Paris correspondant à la somme des emprises des colis basée sur les projections de l'Andra concernant le nombre de ces colis rangé par alvéole.

Source : WISE-Paris d'après Dossier stockage géologique Andra 2005

L'Andra fournit également des projections sur l'emprise globale du stockage, déclinée par zone et selon les scénarios. Outre la comparaison entre scénarios de poursuite ou d'arrêt du retraitement (S1a contre S2), dont on a montré plus haut le caractère biaisé, l'Andra utilise cette méthode pour mettre en évidence l'impact d'un scénario de mise en stockage différée après 150 ans d'entreposage (pour tous les déchets HA-VL hors colis **C0**). Le tableau 6 précise les résultats obtenus et les estimations qui peuvent en être déduites sur un équivalent d'emprise horizontale par déchet primaire, par déchet de stockage et par alvéole.

Tab. 6 Emprise horizontale du stockage pour différents scénarios

	S1a / court	S1a / long	Variation	S2 / court	S2 / long	Variation
Délai entreposage						
Verres anciens **C0**	20 ans	n.d.	n.d.	20 ans	n.d.	n.d.
Verres actuels **C1** et **C2**	60 ans	150 ans	+ 150 %	60 ans	150 ans	+ 150 %
Verres futurs **C3** et **C4**	70 ans	150 ans	+ 114 %	—	—	—
Combustible UOX **CU1**	—	—	—	60 ans	150 ans	+ 150 %
Combustible MOX **CU2**	—	—	—	90 ans	150 ans	+ 67 %
Thermique[a] par colis primaire						
Verres actuels **C1** et **C2**	500 W	200 W	- 60 %	500 W	200 W	- 60 %
Verres futurs **C3** et **C4**	500 W	250 W	- 50 %	—	—	—
Combustible UOX **CU1**	—	—	—	400 W	200 W	- 50 %
Combustible MOX **CU2**	—	—	—	1 100 W	800 W	- 27 %
Emprise par colis primaire[b]						
Déchets B (moyenne)	5 m^2	5 m^2	—	4,8 m^2	4,8 m^2	—
Verres anciens **C0**	19,5 m^2	19,5 m^2	—	19,5 m^2	19,5 m^2	—
Déchets C (moyenne)	155 m^2	93 m^2	- 40 %	132 m^2	47 m^2	- 64 %
Combustible UOX **CU1**	—	—	—	152 m^2	83 m^2	- 45 %
Combustible MOX **CU2**	—	—	—	875 m^2	675 m^2	- 23 %
Emprise par colis de stockage[b]						
Déchets B (moyenne)	18,2 m^2	18,2 m^2	—	17,3 m^2	17,3 m^2	—
Verres anciens **C0**	19,5 m^2	19,5 m^2	—	19,5 m^2	19,5 m^2	—
Déchets C (moyenne)	155 m^2	93 m^2	- 40 %	132 m^2	47 m^2	- 64 %
Combustible UOX **CU1**	—	—	—	607 m^2	333 m^2	- 45 %
Combustible MOX **CU2**	—	—	—	875 m^2	675 m^2	- 23 %
Emprise par alvéole[b]						
Déchets B (moyenne)	2,63 ha	2,63 ha	—	n.d.	n.d.	n.d.
Verres anciens **C0**	0,04 ha	0,04 ha	—	n.d.	n.d.	n.d.
Déchets C (moyenne)	0,10 ha	0,06 ha	- 40 %	n.d.	n.d.	n.d.
Combustible UOX **CU1**	—	—	—	n.d.	n.d.	n.d.
Combustible MOX **CU2**	—	—	—	n.d.	n.d.	n.d.
Emprise totale[c]						
Zone B	100 ha	100 ha	—	80 ha	80 ha	—
Zone **C0**	8 ha	8 ha	—	8 ha	8 ha	—
Zone C	500 ha	300 ha	- 40 %	140 ha	50 ha	- 64 %
Zone **CU1**	—	—	—	820 ha	450 ha	- 45 %
Zone **CU2**	—	—	—	350 ha	270 ha	- 23 %
Total	608 ha	408 ha	- 33 %	1 398 ha	858 ha	- 39 %

a. Les valeurs données pour le dégagement thermique sont des ordres de grandeur.

b. Les emprises par colis primaire, par colis de stockage et par alvéole sont des valeurs calculées par WISE-Paris à partir d'indications dans le dossier de l'Andra sur l'emprise globale de chaque zone du stockage et sur le nombre total de colis et d'alvéoles concerné dans chaque scénario pour chacune des catégories. Les valeurs obtenues sont supérieures aux valeurs nominales par colis de stockage fournies par l'Andra, probablement du fait que l'emprise de chaque zone comprend une partie d'installations communes.

c. Total hors combustibles irradiés autres (**CU3**). Les colis CU3 représenteraient selon l'Andra, dans l'hypothèse de leur stockage, 2 170 colis de stockage, occupant 120 alvéoles et totalisant environ 5 ha d'emprise.

Source : WISE-Paris d'après Dossier stockage géologique Andra 2005

4.4. Volume des déchets en stockage :

L'Andra fournit finalement des indications sur le volume global de déchets pris en compte dans le stockage en fonction des scénarios. Le tableau 7 résume les projections de l'Andra en termes de nombre de colis et d'alvéoles pour leur stockage, et calcule les volumes correspondants d'alvéoles.

Les volumes ainsi obtenus ne portent que sur les ouvrages de stockage à proprement parler, c'est-à-dire les alvéoles recevant les colis de stockage. Ils ne prennent pas en compte les ouvrages communs ou les galeries d'exploitation, beaucoup plus volumineuses. Le volume excavé total est ainsi plusieurs fois supérieur au volume des seules alvéoles. L'Andra indique par exemple un volume excavé total de 7,6 millions de m^3 dans le scénario S1a (dont 1,9 millions de m^3 d'installations communes), contre une estimation du volume des seules alvéoles un peu supérieure à 1 million de m^3. Le ratio entre le volume des alvéoles et l'ensemble du volume excavé prend en compte le linéaire et la section des galeries d'accès nécessaires : il peut varier d'un facteur 2 pour la zone des déchets B (1,8 millions de m^3 dans le scénario S1a), à un facteur 50 pour la zone des déchets C (3,8 millions de m^3).

Tab. 7 Volume de stockage[a] considéré par l'Andra pour différents scénarios

		S1a	S1b	S1c	S2
Colis non ou peu exothermiques					
Déchets B[b]	Nombre de colis primaires	177 370	175 070	175 070	146 250
	Nombre de colis de stockage	48 100	47 500	47 500	40 700
	Volume des colis de stockage (m^3)	282 000	279 000	279 000	240 000
	Nombre d'alvéoles	34	33	33	29
	Volume des alvéoles[c] (m^3)	955 000	927 000	927 000	814 000
Colis moyennement exothermiques					
Déchets **C0**	Nombre de colis primaires	4 120	4 120	4 120	4 120
	Nombre de colis de stockage	4 120	4 120	4 120	4 120
	Volume des colis de stockage (m^3)	1 600	1 600	1 600	1 600
	Nombre d'alvéoles	200	200	200	200
	Volume des alvéoles (m^3)	3 100	3 100	3 100	3 100
Colis fortement exothermiques					
Déchets C	Nombre de colis primaires	32 200	32 100	38 350	10 560
	Nombre de colis de stockage	32 200	32 100	38 350	10 560
	Volume des colis de stockage (m^3)	12 900	12 800	15 300	4 200
	Nombre d'alvéoles	4 800	4 500	4 800	1 400
	Volume des alvéoles (m^3)	74 000	69 000	74 000	22 000
Combustibles **CU1**	Nombre de colis primaires	—	—	—	54 000
	Nombre de colis de stockage	—	—	—	13 500
	Volume des colis de stockage (m^3)	—	—	—	82 000
	Nombre d'alvéoles	—	—	—	3 900
	Volume des alvéoles (m^3)	—	—	—	1 427 000
Combustibles **CU2**	Nombre de colis primaires	—	5 400	5 400	4 000
	Nombre de colis de stockage	—	5 400	5 400	4 000
	Volume des colis de stockage (m^3)	—	7 500	7 500	5 500
	Nombre d'alvéoles	—	1 800	1 800	1 300
	Volume des alvéoles (m^3)	—	433 000	433 000	313 000
Total					
	Volume des colis de stockage (m^3)	296 500	300 900	303 400	331 700
	Nombre d'alvéoles	5 034	6 533	6 833	6 829
	Volume des alvéoles (m^3)	1 032 000	1 432 000	1 437 000	2 579 000

a. Volume des alvéoles (hors galeries d'exploitation, de ventilation, ouvrages communs) pour les déchets liés à la gestion des combustibles usés du parc électronucléaire : ce total n'inclut pas les déchets B d'une autre origine que le retraitement, ni les déchets **CU3** liés aux combustibles d'origines diverses. Les déchets **CU3** représenteraient environ 1 800 m^3 pour 120 alvéoles sans barrière ouvragée.

b. Les valeurs pour les déchets B portent sur les seuls déchets MA-VL issus du retraitement (déchets de Marcoule et de La Hague). Elles sont estimées par WISE-Paris à partir des données de l'Andra sur l'ensemble des déchets B et du calcul de la part dans cet ensemble des déchets issus du retraitement. Les déchets B hors retraitement représentent environ 22 000 colis primaires supplémentaires.

c. Valeur moyenne pour les alvéoles de déchets B, dont le volume total peut aller de 23 100 à 33 000 m^3 par alvéole selon le type de colis.

Source : WISE-Paris d'après Dossier stockage géologique Andra 2005

5. Estimations de WISE-Paris :

La caractérisation des volumes associés à différentes catégories de déchets liés à la gestion des combutibles irradiés doit notamment permettre des comparaisons, utiles à la décision, sur le dimensionnement projeté en fonction de différentes stratégies de gestion des combustibles irradiés. De telles comparaisons peuvent faire l'objet de nombreux biais, en particulier sur deux plans : celui de l'inventaire des déchets pris en compte d'une part, et celui des critères de comparaison d'autre part.

WISE-Paris, après avoir identifié les biais systématiques des évaluations officielles, propose ici une méthode de comparaison de dimensionnement entre retraitement ou non retraitement du combustible irradié sur la base d'un inventaire détaillé des déchets et matières à prendre en compte pour respecter une certaine équivalence dans la comparaison (équivalence en énergie et en périmètre des matières prises en compte). Les calculs s'appuient sur les données déduites des différents concepts et résultats présentés par l'Andra sur les volumes unitaires associés au types de colis correspondants.

5.1. Biais des estimations classiques :

Les estimations comparant les volumes de déchets de stockage en cas de stockage direct ou de retraitement posent un certain nombre de problèmes de méthode. On peut identifier de nombreux biais, qui semblent systématiquement favoriser dans la comparaison l'option retraitement.

En premier lieu, la base de comparaison est en général incomplète. Tout d'abord les matières réutilisables, uranium de retraitement et plutonium, sont totalement écartées du bilan des déchets de l'option retraitement alors même que leur réutilisation génère dans tous les cas de nouveaux déchets. Le volume d'une tonne de combustible UOX irradié conditionné pour un stockage direct et celui des déchets ultimes issus du retraitement de cette même tonne comparent en fait la gestion de 100 % de la masse du combustible à la gestion de 5 % seulement…

De même, une grande attention doit être portée au fait que l'ensemble des déchets supplémentaires induits par le retraitement sont pris en compte, et notamment les déchets d'exploitation et de démantèlement – même si une grande partie ne relève pas d'un éventuel stockage géologique.

Un autre biais usuel est de présenter des comparaisons basées sur les estimations de volume dans les conditions techniques actuelles. Or celles-ci atteignent, par compactage notamment, des performances de réduction de volumes (sans réduction de radioactivité) très supérieures à celles qui ont été mises en œuvre pour la majorité des combustibles retraités à ce jour. De plus, une part non négligeable des déchets produits par ces campagnes de retraitement reste en l'attente de conditionnement définitif, créant une incertitude sur les volumes finaux à prendre en compte.

Les comparaisons doivent également porter sur des estimations homogènes en termes de critère. Il convient par exemple de ne pas comparer des colis de stockage avec des colis primaires, ou des volumes d'ouvrage globaux avec ceux des seules alvéoles. Idéalement l'ensemble des volumes et emprises, correspondant à des critères clairs, devrait être soumis à comparaison.

Enfin, les hypothèses techniques concernant les solutions définitives de stockage devraient appliquer un niveau homogène d'optimisation aux différentes catégories de déchets. Les concepts présentés par l'Andra intègrent des hypothèses favorables au retraitement, telles que la présence d'une barrière ouvragée pour les combustibles usés et non pour les déchets vitrifiés, le choix de colis de stockage non optimisés pour les combustibles UOX, ou l'entreposage pour 30 ans de plus du MOX par rapport à tous les autres déchets. De tels choix devraient s'accompagner d'une analyse de sensibilité.

5.2. Inventaire pris en compte pour une comparaison retraitement / non retraitement :

La comparaison des volumes engendrés en cas de retraitement du combustible ou de stockage géologique en l'état du combustible irradié ne peut être rigoureuse qu'à deux conditions. La première est de préciser la nature des déchets produits par le retraitement à prendre en compte et leur volume rapporté à une unité de combustible retraité. On se limite ici aux productions de déchets des usines UP2-800 (et UP2-400) et UP3 de La Hague pour le retraitement de combustibles irradiés issus des réacteurs à eau pressurisée (REP). La typologie et le volume par tonne retraitée de ces déchets a varié avec l'évolution des technologies mises en œuvre.

Le fonctionnement au dimensionnement d'origine comprend les productions de déchets suivantes :

- vitrification en colis standard de déchets vitrifiés (CSD-V) des déchets liquides de haute-activité (concentrats de produits de fission et d'actinides mineurs, suspensions de fines de cisaillage et de dissolution, effluents aqueux) dans les ateliers R7 (UP3, mis en service en 1989) et T7 (UP2-800, mis en service en 1992) ;
- bétonnage des déchets de structure des assemblages (coques et embouts) dans les ateliers R1 (UP3, mis en service en 1990) et T1 (UP2-800, mis en service en 1994) ;
- bitumage des effluents (boues) dans la station de traitement STE3, mise en service en 1989 ;
- bétonnage des déchets technologiques (déchets d'exploitation), dans l'atelier AD2, mis en service en 1990. Les déchets MA-VL sont conditionnés en colis amiante ciment (CAC), les déchets FMA-VC en colis béton-fibres (CBF-C1).

Par la suite, différents changements ont été apportés :

- en 1995, arrêt du bétonnage des déchets de structure en vue de leur traitement ultérieur par compactage, dans l'Atelier de compactage des coques (ACC), mis en service en 2002 ;
- courant 1995, mise en place d'une nouvelle gestion des effluents (NGE) dans UP3 incorporant l'essentiel des effluent aqueux aux déchets vitrifiés pour réduire fortement la production de colis de déchets bitumés ;
- entre 1994 et 1998, des modifications sont apportées au traitement des déchets technologiques pour en réduire les volumes, dont les principales portent sur :
  - le passage, pour les déchets MA-VL, du conditionnement CAC à un conditionnement béton-fibres (colis CBF-C'2, de même volume utile et extérieur que le CAC) ;
  - la mise en œuvre du compactage d'une partie de ces déchets et leur incorporation comme fraction des colis C&E compactés ;
  - le remplacement progressif des colis CBF-C1 par des colis standard inox de déchets immobilisés (C0) dans l'atelier AD2 ;
  - le déclassement de certains déchets en colis béton-fibres CBF-C2 (ou CBF-C2i) de MA-VL à FMA-VC et leur expédition au Centre de stockage de l'Aube (CSA) ;
  - la mise en place d'une filière d'incinération et de fusion d'une partie des déchets à l'usine Centraco de Marcoule.

Le tableau 8 précise, à partir d'un récapitulatif produit par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) les caractéristiques de conditionnement et les ratio d'incorporation (volumes produits par tonne retraitée) à trois étapes clés : à la mise en service, c'est-à-dire dans le dimensionnement d'origine, dans la gestion mise en œuvre fin 1995 et dans la gestion « optimisée » telle qu'on pouvait l'observer fin 2004.

La seconde condition est de tenir compte dans les volumes estimés de l'ensemble des matières engendrées, c'est-à-dire de ne pas exclure dans le cas du retraitement les matières réutilisables (uranium et plutonium) qui sont extraites du combustible irradié mais ne disparaissent pas pour autant. Ces matières sont actuellement, lorsqu'elles sont réutilisées, respectivement incorporées à du combustible URE et à du combustible MOX. Le tableau 9 rassemble les informations sur les compositions respectives aux périodes considérées des combustibles UOX retraités et des combustibles URE et MOX neufs fabriqués. Ces indications permettent de déduire les tonnages moyens d'URE et de MOX neufs produits à partir d'une tonne de combustible UOX irradié retraitée.

Dans les conditions actuelles, le retraitement des combustibles URE et MOX irradiés est projeté mais pas réalisé. Ce retraitement produirait de nouveaux déchets, ainsi que des matières à réutiliser sous une forme à déterminer – combustible qui serait à son tour retraité, etc. Aussi, pour rester dans une projection réaliste tout en se conformant à la situation industrielle, on se fixe comme principe de comparer l'ensemble des volumes engendrés entre :

- le stockage direct de 1 tonne de combustible UOX,
- le stockage géologique des déchets HA-VL et MA-VL issus du retraitement d'UOX, ainsi que de l'URE et du MOX irradiés dans des quantités correspondant aux combustibles neufs produits à partir des matières récupérées de l'UOX, pour un total de 1 tonne d'UOX+URE+MOX.

Tab. 8 **Déchets produits par le retraitement de combustible irradié à La Hague**

		Ratio d'incorporation[a] (nb/tML)		
		Mise en service	Fin 1995	Fin 2004
Déchets HA-VL				
• verres	Colis standard de déchets vitrifiés CSD-V	0,73	0,54[b]	0,66[c]
Déchets MA-VL				
• structure	Colis C&E bétonné	0,37	0,43[d]	—
	Colis standard de déchets compactés CSD-C	—	—	0,63[e]
• traitement	Colis de déchets bitumés	3,0	1,7[f]	0,08[h]
• technologiques	Colis de déchets enrobés béton CAC	1,2	0,29[g]	—
	Colis de déchets enrobés béton CBF-C'2	—		0,26[h]
Déchets FMA-VC				
• technologiques	Colis de déchets enrobés béton CBF-C1	5,3	4,7[g]	0,43[h]
	Colis de déchets enrobés béton CBF-C2/C2i	—	—	0,21[h]
	Colis de déchets immobilisés C0	—	—	1,8[h]
	Colis de déchets incinérés CENTRACO	—	—	0,03[h]

a. Le ratio d'incorporation précise, pour chaque production de déchet à chaque période donnée, le nombre de colis produits pour une tonne métal lourd (tML) de combustible irradié retraitée.
b. Valeur moyenne correspondant aux caractéristiques moyennes de 5 121 tML de combustible retraitées sur l'ensemble des usines de La Hague (UP2-400, UP2-800, UP3) entre janvier 1991 et décembre 1995 (28,7 GW.j/t, retraitement 7,87 ans après déchargement).
c. Valeur moyenne correspondant aux caractéristiques moyennes de 5 414 tML de combustible retraitées sur l'ensemble des usines de La Hague (UP2-800, UP3) entre janvier 2000 et décembre 2004 (37,4 GW.j/t, retraitement 7,49 ans après déchargement).
d. Bilan du nombre de colis produits rapporté aux tonnages cisaillés dans les ateliers R1 et T1 entre leur mise en service et août 1995.
e. Bilan établi sur la base du retour d'expérience de l'ACC.
f. Bilan du nombre de colis produits rapporté aux tonnages traités dans UP2-800 et UP3 entre janvier 1991 et décembre 1995.
g. Bilan du nombre de colis produits rapporté aux tonnages traités dans UP2-400, UP2-800 et UP3 entre janvier 1991 et décembre 1995.
h. Bilan du nombre de colis produits rapporté aux tonnages traités dans UP2-800 et UP3 entre janvier 2000 et décembre 2004.

Source : IRSN, courrier CSPI 2006

Tab. 9 **Caractéristiques des combustibles UOX retraités et des combustibles URE et MOX**

	Mise en service	Fin 1995	Fin 2004
Combustible UOX retraité			
Teneur initiale en uranium-235 (%)	3,25	3,25	3,7
Taux de combustion moyen (GW.j/t)	26[a]	28,7[b]	37,4[c]
Teneur finale en uranium RepU (%)	95	95	95
Teneur finale en uranium-235 du RepU (%)	1,1	1,0	0,75
Teneur finale en plutonium (%)	0,9	0,9	1,0
Combustible URE neuf			
Teneur initiale en uranium-235 (%)	3,7[d]	3,7[d]	4,1[e]
Poids URE neuf pour 1 tML UOX retraité (tML)	0,175[f]	0,162[f]	0,132[f]
Combustible MOX neuf			
Teneur initale en plutonium	5,25[g]	5,25[h]	7,08[i]
Poids MOX neuf pour 1 tML UOX retraité (tML)	0,171	0,171	0,141

a. Estimation de caractéristiques représentatives des combustibles retraités au début de l'exploitation des usines de La Hague.
b. Valeur moyenne correspondant aux combustibles retraités dans UP2-400, UP2-800 et UP3 entre janvier 1991 et décembre 1995.
c. Valeur moyenne correspondant aux combustibles retraités dans UP2-800 et UP3 entre janvier 2000 et décembre 2004.
d. On utilise pour la période de mise en service des caractéristiques de l'URE identiques à celles de 1995. L'utilisation d'URE dans quelques réacteurs 900 MWe a commencé en 1994, avec un uranium de retraitement équivalent d'un UOX enrichi à 3,25 %.
e. En 1999 a été introduite une nouvelle gestion du combustible URE, équivalent d'un UOX enrichi à 3,7 %.
f. Ce ratio dépend des choix industriels sur le facteur de réenrichissement (on utilise ici respectivement des facteurs de 6, de 6,5 et de 10).
g. Correspondant à la gestion du combustible MOX introduite entre 1987 et 1989.
h. Correspondant à la gestion dite « Garance MOX » du combustible MOX entre 1994 et 1998.
i. Correspondant à la gestion dite « MOX hybride » du combustible MOX depuis 1999.

Source : IRSN, courrier CSPI 2006

5.3. Volumes ou emprises unitaires :

Les tableaux 10 et 11 reprennent, pour chacun des produits considérés selon le principe de comparaison posé ci-dessus, les principales caractéristiques estimées en termes de volume (de colis primaire, de colis de stockage, d'alvéole, d'ouvrage excavé) et d'emprise (des alvéoles, et de l'ouvrage).

Tab. 10 **Volumes de colis de stockage, d'alvéole et d'ouvrage par type de colis primaire**

		Volume du colis primaire (m^3)	Colis de stockage		Volume colis de stockage par colis primaire	Alvéole stockage		Volume alvéole par colis primaire	Volume ouvrage[c] par colis primaire
			Nb. colis primaires	Volume (m^3)		Nb. colis stockage	Volume (m^3)		
MA-VL									
C&E bétonné	**B4**	1,8	2	10,44[a]	5,22	930[b]	27 700	14,9	30
CSD-C	**B5.1** à **.4**	0,18	4	4,79[a]	1,20	1 350[b]	22 700	4,21	8
Boues bitumées	**B2.1a**	0,24	4	3,32[a]	0,83	2 400[b]	25 100	2,62	5
CAC - CBF-C'2	**B3.1.2**	1,2	2	8,01[a]	4,00	1 000[b]	25 100	12,7	25
HA-VL									
CSD-V	**C1**	0,18	1	0,44	0,44	8	15,4	1,93	95
UOX irradié	**CU1**	0,19[d]	4	5,56	1,39	4	366	22,9	180
URE irradié	**CU1**	0,19[d]	4	5,56	1,39	4	366	22,9	180
MOX irradié	**CU2**	0,19[d]	1	1,36	1,36	3	240	80,0	880

a. Les estimations de volumes de colis de stockage MA-VL correspondant aux catégories de déchets visées sont basées sur les indications données par l'IRSN (courrier à la CSPI) sur les caractéristiques de colis de stockage pour chaque type de déchets concerné.

b. Les estimations sur le nombre de colis MA-VL par alvéole sont basées sur les hypothèses de dimensionnement suivantes : 3 niveaux par 2 colonnes pour **B4**, 3 niveaux par 3 colonnes pour **B5**, 4 niveaux par 4 colonnes pour **B2.1a**, et 3 niveaux par 2 colonnes pour **B3.1.2**. Les estimations de volume des alvéoles prennent en compte les diamètres correspondants.

c. Le volume d'ouvrage désigne l'ensemble du volume excavé pour la zone de déchets correspondante (B, C, CU1, CU2). Le chiffre présenté est basé sur le facteur entre alvéoles seules et total excavé, calculé par WISE-Paris avec les ordres de grandeur suivants :
- déchets B, on applique le facteur 2 déduit des indications de l'Andra sur le volume excavé pour la zone de déchets B (scénario S1a) ;
- déchets C, on applique le facteur 50 déduit des indications de l'Andra sur le volume excavé pour la zone de déchets C (scénario S1a) ;
- combustibles irradiés, on applique un facteur estimé à partir du facteur applicable aux déchets C, qui correspond environ à 3 millions de m^3 excavés pour 4 800 alvéoles. On considère, à partir du dossier Andra, que les alvéoles de combustibles irradiés sont de longueur équivalente mais deux fois plus espacées, et que les galeries d'accès ont en ordre de grandeur un volume double de celles d'accès aux déchets C (équivalent d'un diamètre excavé moyen de 10 m contre 7 m pour les déchets C). On obtient en ordre de grandeur un facteur 8 pour les combustibles UOX ou URE, et un facteur 11 pour les combustibles MOX.

d. Pour les combustibles irradiés, les colis primaires sont les assemblages combustible. Les volumes indiqués correspondent aux assemblages courts (combustible de réacteurs 900 MWe).

Source : WISE-Paris d'après Dossier stockage géologique Andra 2005 ; IRSN, courrier CSPI 2006

Tab. 11 **Emprises d'alvéole et d'ouvrage par type de colis primaire**

		Délai (ans)	Thermique colis primaire[a] (W)	Emprise alvéole[b]	Emprise alvéole par colis primaire	Emprise globale[c] par colis primaire
MA-VL						
C&E bétonné	**B4**	n.d.	n.d.	25 000	27	28
CSD-C	**B5.1** à **.4**	n.d.	n.d.	25 000	19	20
Boues bitumées	**B2.1a**	n.d.	n.d.	25 000	10	11
CAC - CBF-C'2	**B3.1.2**	n.d.	n.d.	25 000	25	26
HA-VL						
CSD-V	**C1**	60	500	640	80	130
UOX irradié	**CU1**	60	400	1 200	75	150
URE irradié	**CU1**	60	400	1 200	75	150
MOX irradié	**CU2**	90	1 100	1 050	350	875

a. Les indications de dégagement thermique par colis primaire sont des ordres de grandeur caractéristiques.

b. Les emprises d'alvéoles sont calculées à partir des indications de l'Andra sur la disposition, telles que l'entraxe entre alvéoles, etc.

c. Les emprises globales d'ouvrage par colis primaire sont déduites des données fournies par l'Andra sur les emprises de chaque zone dans ses différents scénarios.

Source : WISE-Paris d'après Dossier stockage géologique Andra 2005

5.4. Résultats :

Les tableaux précédents indiquent d'une part les ratios de production de colis primaires (déchets de retraitement et combustibles de réutilisation irradiés) par tonne de combustible UOX retraitée, d'autre part les volumes de colis de stockage, d'alvéole et d'ouvrage ainsi que les emprises par type de colis primaire. On peut dès lors comparer la somme des volumes ou emprises selon les différents critères dans deux options : le stockage direct d'une tonne d'UOX, ou le retraitement d'une quantité d'UOX énergétiquement équivalente (i.e. telle que la somme de l'UOX retraité et des URE et MOX de réutilisation qui en sont issus atteigne une tonne).

On fait ce calcul pour les trois étapes représentatives de l'évolution du retraitement. Le tableau 12 rassemble les résultats de ces comparaisons, dont la figure 15 donne un aperçu critère par critère.

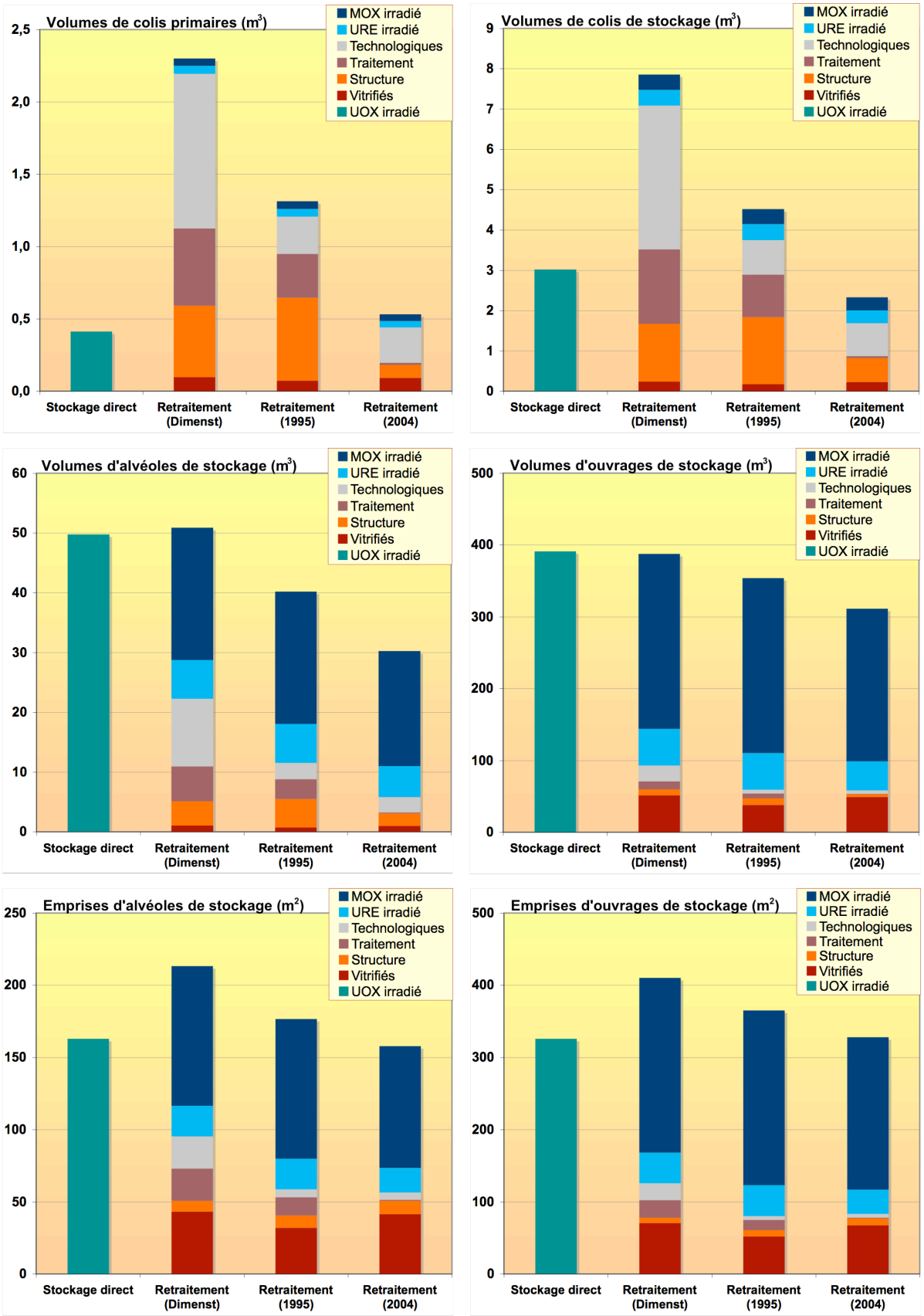
Tab. 12 Comparaison des volumes et des emprises générés selon le choix du stockage direct (A) ou du retraitement (B) pour des quantités énergétiquement équivalentes[a]

Volumes : m^3 Emprises : m^2	Volume colis primaire	Volume colis stockage	Volume alvéole stockage	Volume ouvrage	Emprise alvéole stockage	Emprise ouvrage
Dimensionnement						
A. Combustible usé UOX	**0,413**	**3,02**	**49,8**	**391,3**	**163,0**	**326,1**
Déchets vitrifiés	0,098	0,24	1,0	51,5	43,4	70,5
Déchets de structure	0,494	1,43	4,1	8,2	7,4	7,7
Déchets de traitement	0,535	1,85	5,8	11,1	22,3	24,5
Déchets technologiques	1,069	3,56	11,3	22,3	22,3	23,2
Total déchets	***2,196***	***7,09***	***22,3***	***93,1***	***95,3***	***125,8***
Combustible usé URE	0,054	0,39	6,5	51,0	21,2	42,5
Combustible usé MOX	0,053	0,38	22,1	243,5	96,8	242,1
B. Retraitement (total)	**2,302**	**7,85**	**50,9**	**387,6**	**213,4**	**410,4**
Fin 1995						
A. Combustible usé UOX	**0,413**	**3,02**	**49,8**	**391,3**	**163,0**	**326,1**
Déchets vitrifiés	0,072	0,18	0,8	38,1	32,1	52,1
Déchets de structure	0,575	1,67	4,8	9,6	8,6	8,9
Déchets de traitement	0,303	1,05	3,3	6,3	12,6	13,9
Déchets technologiques	0,258	0,86	2,7	5,4	5,4	5,6
Total déchets	***1,208***	***3,75***	***11,6***	***59,4***	***58,7***	***80,5***
Combustible usé URE	0,054	0,39	6,5	51,0	21,2	42,5
Combustible usé MOX	0,053	0,38	22,1	243,5	96,8	242,1
B. Retraitement (total)	**1,315**	**4,52**	**40,2**	**353,8**	**176,8**	**365,1**
Fin 2004						
A. Combustible usé UOX	**0,413**	**3,02**	**49,8**	**391,3**	**163,0**	**326,1**
Déchets vitrifiés	0,093	0,23	1,0	49,3	41,5	67,4
Déchets de structure	0,089	0,59	2,1	4,0	9,4	9,9
Déchets de traitement	0,015	0,05	0,2	0,3	0,6	0,7
Déchets technologiques	0,245	0,82	2,6	5,1	5,1	5,3
Total déchets	***0,443***	***1,69***	***5,8***	***58,6***	***56,6***	***83,3***
Combustible usé URE	0,043	0,31	5,1	40,5	16,9	33,7
Combustible usé MOX	0,046	0,33	19,3	212,3	84,4	211,1
B. Retraitement (total)	**0,531**	**2,33**	**30,3**	**311,4**	**157,9**	**328,1**

a. La comparaison est construite sur la base suivante : dans l'option stockage direct, les volumes sont estimés pour 1 tML de combustible UOX irradié ; dans l'option retraitement, c'est l'ensemble du tonnage d'UOX retraité et des fractions d'URE et de MOX fabriquées qui doit représenter 1 tML. Au dimensionnement et en 1995, on compte 0,742 tML d'UOX, 0,130 tML d'URE et 0,127 tML de MOX. En 2004 on compte 0,786 tML d'UOX, 0,103 tML d'URE et 0,111 tML de MOX.

Source : Estimations WISE-Paris à partir de données Andra 2005, Areva 2005, IRSN 2006

Fig. 15 **Comparaison des volumes et emprises entre stockage direct et retraitement**



Source : Estimations WISE-Paris à partir de données Andra 2005, Areva 2005, IRSN 2006

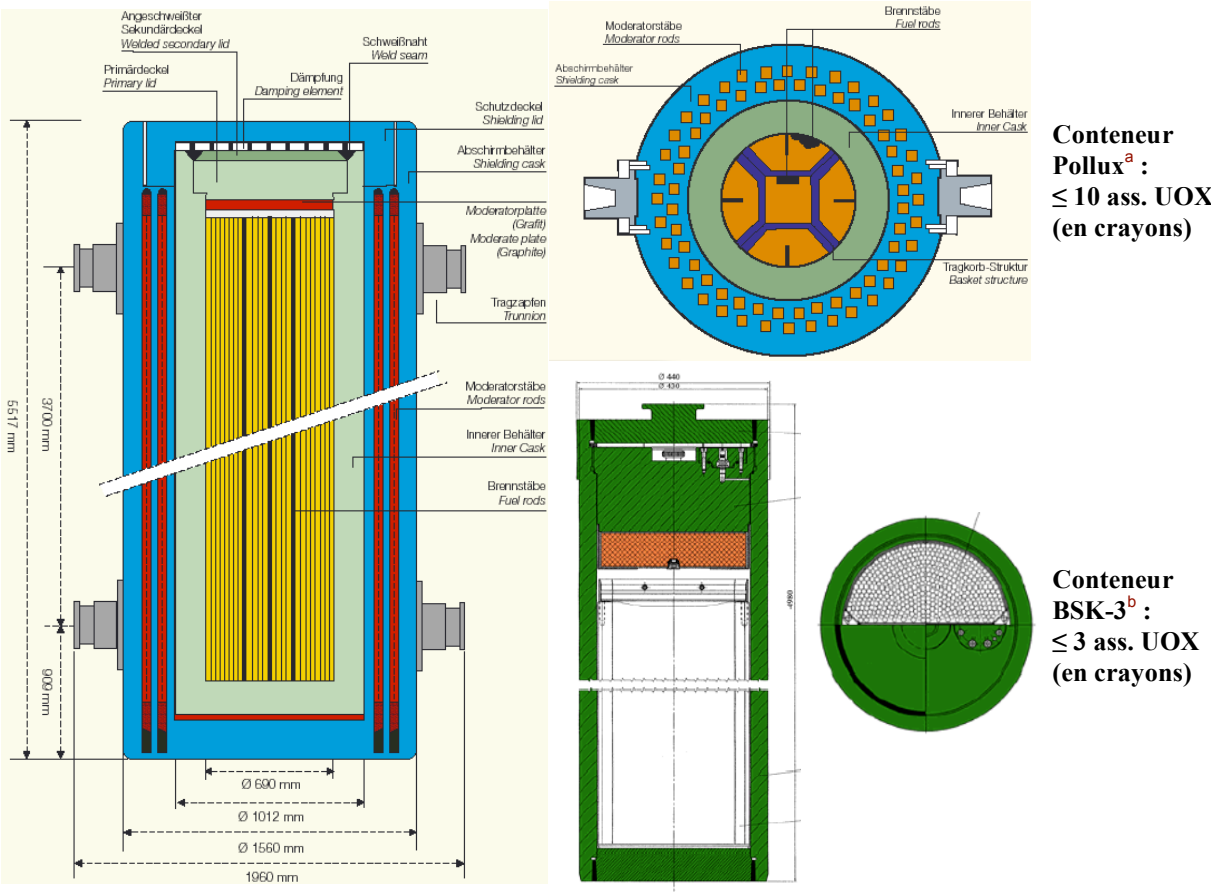
5.5. Variantes :

Les calculs précédents restent basés sur des hypothèses de conception et de gestion globalement favorables, en terme de comparaison de volumes, à l'option retraitement. On teste ici l'introduction d'hypothèses réalistes moins pénalisantes pour le stockage en l'état du combustible irradié.

Trois facteurs significatifs nous semblent devoir être discutés en particulier :

- Le conditionnement pour stockage des combustibles UOX irradiés ne présente pas, dans le concept proposé par l'Andra, un optimum de volume. Des concepts existent qui s'appuient sur le désassemblage des assemblages combustibles, permettant un rangement plus dense des crayons. La figure 16 présente deux concepts de colis de ce type développés en Allemagne : le conteneur Pollux qui rassemble jusqu'à 10 assemblages, et surtout le conteneur BSK-3, qui réunit les crayons de 3 assemblages dans un colis du diamètre des colis de déchets vitrifiés.
- L'absence de barrière ouvragée pour les alvéoles de colis de déchets vitrifiés est présentée par l'Andra comme une option préférentielle dont la justification est cependant peu développée. Il semble nécessaire d'envisager l'application d'une barrière semblable à celle des galeries d'UOX.
- Le délai supérieur d'entreposage du MOX irradié avant stockage (90 ans au lieu de 60 ans pour les autres déchets) est un principe de gestion pénalisant pour les générations futures. On propose de considérer l'hypothèse d'un entreposage du MOX avant stockage ramené à 60 ans (on écarte ici l'hypothèse possible d'une uniformisation de toutes les durées d'entreposage à 90 ans).

Fig. 16 Conteneurs pour combustible irradié étudiés en Allemagne



a. Pollux : conteneur interne en acier de 16 cm d'épaisseur, conteneur externe en fer de 27 cm d'épaisseur. Son diamètre est de 1,56 m pour une longueur totale de 5,52 m. Il peut contenir jusqu'à l'équivalent de 10 assemblages UOX de réacteurs REP en crayons désassemblés. Un concept de stockage en galeries horizontales semble privilégié pour ce colis.

b. BSK 3 : conteneur en acier de 5 cm d'épaisseur sans surconteneur. Son diamètre est de 0,43 m, équivalent à celui des conteneurs de déchets vitrifiés, pour une longueur de 4,9 m. Il peut contenir jusqu'à l'équivalent de 3 assemblages UOX de réacteurs REP en crayons désassemblés. Un concept de stockage en puits verticaux semble privilégié pour ce colis.

Source : GRS, Rapport annuel 2004/2005

On propose ainsi de mener une comparaison entre la situation fin 2004 telle qu'elle a été estimée précédemment à partir des études d'Areva, de l'IRSN et de l'Andra, et une variante réaliste incluant :

- la mise en œuvre du stockage du combustible UOX (et URE) irradié en conteneurs BSK-3,
- la mise en place d'une barrière ouvragée pour les galeries de colis de déchets vitrifiés,
- le stockage du MOX irradié après 60 ans comme pour les autres déchets concernés.

Le tableau 13 et la figure 17 présentent, en explicitant les hypothèses ci-dessus, les principaux résultats obtenus pour le volume de colisage et d'alvéole de stockage.

Tab. 13 Impact de variantes sur les volumes de stockage (colis / alvéole) par tonne d'UOX

Volumes : m^3	Ratio équiv. 1 tML d'UOX[a]	Situation fin 2004			Variante		
		Volume colis primaire	Volume colis stockage	Volume alvéole stockage	Volume colis primaire	Volume colis stockage	Volume alvéole stockage
Combustible usé UOX	**1 t**	**0,413**	**3,02**	**49,8**	**0,325**	**0,52[b]**	**27,7[c]**
Déchets vitrifiés	0,52 c.	0,093	0,23	1,0	0,093	0,23	12,5[d]
Déchets de structure	0,49 c.	0,089	0,59	2,1	0,089	0,59	2,1
Déchets de traitement	0,06 c.	0,015	0,05	0,2	0,015	0,05	0,2
Déchets technologiques	0,20 c.	0,245	0,82	2,6	0,245	0,82	2,6
Total déchets	—	***0,443***	***1,69***	***5,8***	***0,443***	***1,69***	***17,4***
Combustible usé URE	0,103 t	0,043	0,31	5,1	0,043	0,05[b]	2,9[c]
Combustible usé MOX	0,111 t	0,046	0,33	19,3	0,046	0,33	25,5[e]
Retraitement (total)	—	**0,531**	**2,33**	**30,3**	**0,531**	**2,07**	**45,7**

a. On indique pour chaque catégorie le nombre de colis primaires (c.) liés à l'utilisation d'une tonne ML de combustible : 0,786 tML de combustible UOX retraité, les déchets générés et le tonnage (tML) de combustible irradié URE ou MOX issu des matières réutilisées.

b. Le BSK-3 contient 1,38 tML (3 assemblages) pour 0,71 m^3, soit 0,516 m^3 / tML_{UOX}. Le même ratio s'applique pour l'URE.
La réduction de volume de colis de stockage (division par 5,8) est bien moindre dans l'hypothèse d'un stockage en colis Pollux. En effet, ceux-ci peuvent contenir au maximum 4,6 tML dans un colis de 10,55 m^3, soit 2,30 m^3 / tML_{UOX}.

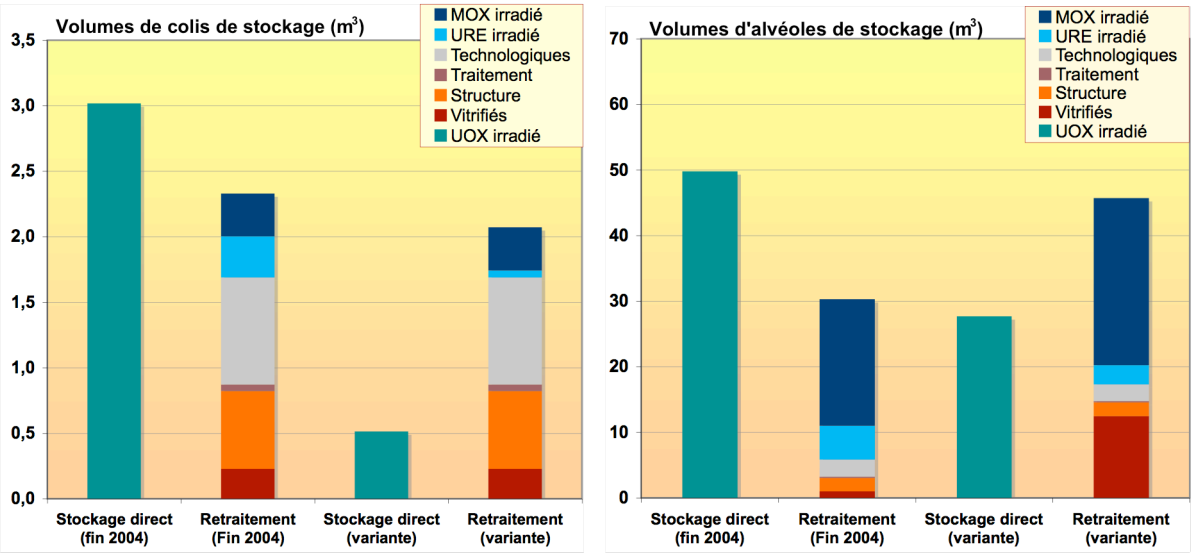
c. Pour une épaisseur de barrière ouvragée inchangée par rapport au concept de galerie détaillé par l'Andra, le diamètre d'alvéole est ramené de 3,30 m à 2,47 m (en lien avec le remplacement du colis standard de diamètre 1,255 m par le colis BSK-3 de diamètre 0,43 m). Le volume global de l'alvéole est ainsi réduit de 366 m^3 à 206 m^3 (soit un facteur 0,563). Ce facteur s'applique à l'UOX comme à l'URE.

d. Pour une barrière ouvragée de même épaisseur que pour le combustible UOX stocké en l'état (soit un même diamètre qu'avec le BSK-3, donc 2,47 m), le volume d'une alvéole de stockage de déchets vitrifiés passe de 15,4 m^3 à 192 m^3 (soit un facteur 12,5).

e. On suppose, pour un stockage du MOX irradié après 60 ans au lieu de 90 ans, que deux colis sont stockés dans une galerie de 40 m au lieu de trois colis dans une galerie de 45,3 m. Le volume d'alvéole passe de 80 m^3 à 106 m^3 par colis, soit un facteur 1,32.

Source : Estimations WISE-Paris à partir de données Andra 2005, Areva 2005, IRSN 2006

Fig. 17 Comparaison des volumes de stockage (colis / alvéole) en fonction des variantes



Source : Estimations WISE-Paris à partir de données Andra 2005, Areva 2005, IRSN 2006