

Les risques liés au projet CIGEO

I. Incendie et explosion	p. 2
a) Risque d'incendie par le matériel	p. 2
b) Bitumes	p. 5
c) Hydrogène	p. 6
1) Dégagement	p. 6
2) Limite Inférieure d'Explosivité (LIE)	p. 6
3) Evacuation des gaz	p. 6
4) Analyse des risques	p. 7
II. Rejets en surface	p. 9
a) Zone puits	p. 9
b) Zone descenderie	p. 9
c) Chimique et radioactif	p. 11
1) Chimique	p. 11
2) Radioactif	p. 11
• En phase d'exploitation	p. 12
→ Protéger contre la dissémination	p. 12
→ Protéger contre l'irradiation	p. 12
→ Immobiliser les radionucléides	p. 13
→ Retarder leur migration	p. 14
→ Analyse des risques de dispersion	p. 15
• En phase post fermeture	p. 18
→ Contribution des colis HA	p. 18
→ Contributions des colis MAVL	p. 20
→ Contribution du milieu géologique	p. 22
→ Contribution de l'architecture	p. 25

d) Ventilation	p. 26
1) En cas d'incendie	p. 27
2) En cas de perte de ventilation	p. 28
3) Contribution de la ventilation	p. 28
III. Eau	p. 30
a) Récupération lors du creusement et pendant l'exploitation	p. 30
b) Eau utilisée pour les travaux au fond	p. 33
c) Post fermeture	p. 33
1) Contribution de la formation hôte	p. 33
2) Contribution de l'architecture	p. 33
3) Les scénarios d'évolution	p. 34
 Analyses de la gestion des incertitudes selon leurs origines	 p. 35

En noir : Dossier ANDRA Argile 2005, en rouge : Dossier ANDRA Argile 2009, en vert : Etude de danger ANDRA 2009, en bleu : Dossier Maître d'Ouvrage ANDRA 2013, en violet Avis IRSN 2010, en orange Rapport Risques IRSN 2014 (portant sur le document Jalon Jesq05 interne à l'ANDRA, précédant les documents APS puis APD)

I. Incendie et Explosion :

a) Risques d'incendies par le matériel

Ces risques sont étudiés car ils seraient la 1^{ère} étape nécessaire pour déclencher par exemple un feu de colis bitume. Les risques principaux sont liés aux engins utilisés, aux courts-circuits électriques (50%), aux fuites d'huile sur surface chaude, ou à une surchauffe moteur. (dossier 2005).

Les solutions envisagées sont : limitations avec matériaux ininflammables, maintenance des engins, détecteurs, extincteurs ... prise en charge la plus rapide possible et avoir un service de sécurité spécialisé de pompiers à moins de 3,5km (dossier 2005).

L'étude préliminaire des risques d'incendie a montré que les installations de transfert surface/fond et souterraines présentent un risque d'incendie maîtrisé sous réserve de la mise en œuvre de dispositions techniques et organisationnelles. Elle a permis d'identifier :

- Les zones/locaux qui présentent des situations d'incendie susceptibles de contaminer les installations et de relâcher des substances radioactives dans l'environnement : les installations de transfert des colis MAVL et les alvéoles de stockage MAVL ;
- La zone centrale qui rassemble les activités qui peuvent générer les incendies les plus importants ;
- Les concepts descenderie funiculaire et puits qui présentent une sensibilité au départ de feu faible par conception ;
- Les zones qui présentent des situations d'incendie mais sans conséquences radiologiques : la zone HA pour laquelle des dispositions similaires à celles retenues pour la conception de la zone MAVL seront appliquées à la conception des véhicules, navettes et équipements.

Mesures préventives : matériaux choisis pour limiter voire éliminer les produits combustibles et inflammables, favorisant la meilleure tenue au feu, réduisant les sources d'allumages potentiels.

Mesures de détection / surveillance : il sera installé un système de Détection Automatique d'Incendie (DAI) dans les installations 'sensibles', dispositif permettant de déceler et localiser tout départ de feu, d'avertir le personnel, déclencher l'intervention des moyens de secours et de pilotage de la ventilation. Des systèmes de détection embarqués sont installés sur les véhicules ...

Mesures de protection et de limitation des conséquences : il est aussi prévu une lutte rapide contre le feu, la limitation de la propagation (coupe-feu), la surveillance et gestion à distance, le confinement dynamique, redondance, sécurisation des moyens par des voies électriques différentes ...

Une autre source possible d'explosion en dehors de celle avec l'hydrogène est le risque d'explosion avec les batteries des véhicules électriques, le choix de ces batteries sera fait pour limiter les risques. La zone de rechargement des batteries sera implantée à distance des colis de stockage. (option de sûreté jalon 2009)

L'IRSN précise qu'elle a demandé à l'ANDRA d'aller plus loin sur la démarche d'analyse des risques liés à l'incendie pour la DAC : en ajoutant à l'analyse des risques applicables aux INB de surface (et en particulier à l'extérieur de l'INB) l'analyse des risques en ouvrages souterrains avec les conséquences à l'intérieur et à l'extérieur. Par ailleurs l'ANDRA s'est engagée à justifier la capacité des dispositions de protection contre l'incendie à prévenir et à limiter les conséquences des incidents ou accidents liés à l'incendie, ainsi qu'à justifier le

caractère enveloppe des effets des incendies retenus pour le dimensionnement des dispositions de protection. L'IRSN juge nécessaire d'inclure dans le dossier DAC la démonstration de résistance au feu des structures de l'installation, au regard des exigences de sûreté et des situations enveloppes retenues. (Avis IRSN 2010).

Les principes de prévention, de détection et surveillance détaillés par l'ANDRA dans ce dossier 2009 sont globalement satisfaisants. L'ANDRA s'est engagée à préciser les dispositions de détection des départs de feu dans la zone de travaux et à justifier le cas échéant l'absence de telles dispositions dans les alvéoles MAVL. Elle précisera aussi dans le dossier DAC les principes de sectorisation et les exigences associées pour les locaux présentant les dangers d'incendie les plus importants ou à maintenir à l'abri des effets d'un incendie, notamment dans la zone centrale de soutien et les installations de liaison jour-fond, et présentera les dispositions permettant d'éviter la propagation d'un incendie entre la cellule de manutention et la partie utile de l'alvéole MAVL associée.

L'IRSN recommande que l'Andra complète l'analyse des risques liés à l'incendie en présentant les dispositions complémentaires visant à éteindre un feu dans les zones où les conditions d'ambiance possibles ne permettraient pas l'intervention humaine, notamment dans la partie utile des alvéoles MAVL en cas de défaillance du système d'extinction embarqué sur l'engin de mise en alvéole. En tout état de cause, il conviendra de justifier l'exclusion d'un scénario d'incendie de reprise de réactions exothermiques à l'intérieur de colis, notamment de boues bitumées, dans les situations de fonctionnement normal et incidentel du stockage.

En ce qui concerne la prévention du risque d'explosion lié à la charge des batteries, l'IRSN rappelle que dans les options de conception présentées par l'Andra, la cellule de manutention est adjacente à la partie utile de l'alvéole. (Avis IRSN 2010). L'Andra s'est engagée à justifier, dans le dossier accompagnant la DAC, le lieu de charge des batteries des engins de manutention des alvéoles MAVL et, le cas échéant, l'absence de matériels ATEX dans la cellule de manutention des alvéoles MAVL. (Avis IRSN 2010).

L'Andra a élaboré un référentiel incendie (prévention et limitation des risques liés à l'incendie, pouvant avoir des conséquences à l'intérieur et à l'extérieur de l'installation nucléaire souterraine), conformément à la demande de l'IRSN de 2010. (Rapport Risques IRSN 2014)

L'Andra s'est engagée à compléter, dans le dossier accompagnant la DAC, les exigences de son référentiel incendie relatives à l'opacité et la toxicité des fumées.

En l'absence de feu de référence consolidé au stade de l'esquisse, l'IRSN considère que les engagements suite à l'avis 2010 restent donc à solder, au plus tard dans le dossier accompagnant la DAC.

L'IRSN estime important d'analyser les conséquences de la défaillance de toute disposition de maîtrise des risques incendie et, le cas échéant, de justifier leur exclusion. (Rapport Risques IRSN 2014).

Au stade de l'esquisse, l'Andra présente les principes de sectorisation pour la descenderie « exploitation colis » (fermeture des portes des gares haute et basse) ainsi que pour les alvéoles MAVL (un secteur de feu constitué de la cellule de manutention et de la partie utile de l'alvéole et un secteur de feu constitué du local filtration) et les principes de compartimentage des galeries de liaison et d'accès (fermeture de portes dans les galeries). L'Andra ne présente toutefois pas les dispositions associées à ces principes. Il conviendra donc, pour solder l'engagement pris par l'Andra en 2010 pour le dossier accompagnant la

DAC, que l'Andra précise les exigences et les dispositions liées à ces principes, celles associées à la ZSL ainsi que celles permettant d'éviter la propagation d'un incendie entre la cellule de manutention et la partie utile d'un alvéole MAVL. (Rapport Risques IRSN 2014). L'IRSN rappelle que la présentation des méthodes et outils (logiciels de calculs, retour d'expérience, jugement d'experts...) utilisés pour l'analyse des risques liés à l'incendie ainsi que la démonstration de leur pertinence pour les domaines dans lesquels ils sont utilisés sont attendues dans le dossier accompagnant la DAC

L'IRSN recommande que l'Andra présente, dans le dossier accompagnant la DAC, un programme de surveillance pendant la phase d'exploitation et de réversibilité permettant de détecter au plus tôt une montée progressive de la température des colis de stockage présentant des risques de réactions exothermiques. Ce programme de surveillance devra être établi sur la base d'une étude de la stabilité thermique des colis de stockage en situations normale, incidentelles et accidentelles.

L'IRSN recommande aussi que l'Andra présente, dans le DOS et au titre des premières évaluations complémentaires de sûreté (ECS), l'étude d'un scénario d'emballage de réactions exothermiques à l'intérieur de plusieurs colis de boues bitumées et, sur cette base, identifie le cas échéant les dispositions complémentaires nécessaires pour éviter l'occurrence d'un rejet important ou en limiter les conséquences. (Rapport Risques IRSN 2014).

L'ANDRA retient au stade de l'esquisse le transfert sur rails pour la manutention des colis au sein des installations souterraines et abandonne le choix d'engins de manutention à moteur thermique sur pneus. L'IRSN estime que ce principe conduit à minimiser l'introduction dans l'installation souterraine de matériaux à forte capacité calorifique et que les rails permettent de favoriser le suivi des trajectoires prévues des chariots de transfert transportant les colis. Ceci est satisfaisant au regard des risques liés à l'incendie et à la manutention. Mais l'IRSN souligne l'importance des critères de limitation croisements entre véhicules ainsi que celle des modalités de croisements des véhicules de transfert de colis avec d'autres engins au regard des risques liés à la manutention et considère que ces éléments devront être pris en compte par l'Andra dans la démonstration de sûreté qui sera présentée dans le dossier accompagnant la DAC. (Rapport Risques IRSN 2014).

b) Bitumes

Le risque étudié est la reprise de réaction exothermique dans les colis de bitume dans le cas d'un incendie d'engin de transfert de hotte (plus de 120°C) mais l'auto-inflammation est possible à 350°C (dossier 2005).

En surface : Le risque d'incendie le plus important est lié aux transports des fûts d'enrobés bitumineux et lors des acheminements des emballages sur lorries depuis le terminal ferroviaire jusqu'au hall de réception des emballages par des engins diesel.

Conséquences d'une explosion au sein d'un colis de stockage : si l'explosion se fait au sommet du déchet, elle ne génère aucun dégât important mais risque de dessertissage du bouchon ; si l'explosion est au centre, le béton se fissure mais il n'y a pas d'atteinte du colis primaire et du colis de stockage. (option de sûreté jalon 2009)

L'IRSN rappelle que le critère de 120°C est fortement remis en cause, déjà dès le dossier 2005, et qu'il n'est toujours pas justifié. (Avis IRSN 2010).

c) Hydrogène

Certains colis de déchets MAVL émettent des gaz de radiolyse depuis leur arrivée dans les installations de surface jusqu'à leur stockage en alvéole. Ces gaz ont pour origine le phénomène de radiolyse qui est lié à l'effet des rayonnements ionisants en particulier alpha émis par les substances radioactives sur les produits hydrogénés présents dans ces colis (matières organiques, eau de la matrice de conditionnement).

Ces gaz de radiolyse sont majoritairement l'hydrogène (plus de 90 % du dégagement gazeux) et, à un moindre degré, le méthane. L'émission de ces gaz peut être à l'origine d'une explosion si leurs concentrations dépassent leur limite inférieure d'explosivité (LIE) en présence d'une source d'ignition. (option de sûreté jalon 2009)

1) Le dégagement d'hydrogène est fonction de la présence de matériaux ferreux (radiolyse), dans les alvéoles C 330 à 600 m³, dans les alvéoles CU 1300 à 3100 m³, dans les alvéoles B 1400 à 5000 m³, le dégagement d'hydrogène se fait donc en alvéole B en particulier (dossier 2005).

Le phénomène de radiolyse se produit par rayonnements ionisants sur des substances hydrogénées (eau contenue dans les ciments) ou organiques (bitume), ce qui concerne surtout les colis MAVL (enrobés bitumineux, conteneurs amiante-ciment, conteneurs en béton, fûts de coques et embouts cimentés). Les colis HA n'émettent pas de gaz de radiolyse. (option de sûreté jalon 2009)

2) La limite inférieure d'explosivité ou LIE pour l'hydrogène est de 4% (et il faut la présence d'oxygène). En cas d'arrêt des ventilations, il faudrait environ 30 j pour arriver à la LIE. Cas particulier des alvéoles fermées : s'il y avait besoin d'une intervention post fermeture, forage en atmosphère inerte avec un sas (dossier 2005). **En cas de perte de ventilation il faudra plus de 10j pour rétablir la situation (dossier MO 2013).** En cas d'explosion au sein d'une alvéole, les colis ne seraient que faiblement endommagés. Système de surveillance de la ventilation, fiabilisation, système de secours, groupes électrogènes. Les quantités d'hydrogène produites sont quantifiées suivant les colis et limitées lors du stockage.

Les locaux à risque seront équipés de capteurs pour la surveillance de la concentration en hydrogène.

3) Evacuer les gaz de radiolyse :

→ Dispositifs de maîtrise du risque d'explosion lié à la formation de gaz :

Limiter la concentration en gaz explosifs à 25 % de la limite inférieure d'explosivité (LIE) pour l'ensemble des locaux de l'installation (soit 1% d'hydrogène) et à 10 % de la LIE (0,4 %), pour les locaux dans lesquels des personnes travaillent,

Dimensionner les colis de stockage,

Dimensionner la ventilation pour homogénéiser et évacuer les gaz explosifs.

→ Dispositifs de surveillance :

Vérifier l'efficacité de la ventilation pour homogénéiser et évacuer les gaz explosifs. (option de sûreté jalon 2009)

Le colis de stockage MAVL doit permettre d'évacuer les gaz de radiolyse émis par les colis primaires (option de sûreté jalon 2009)

4) Les principales conclusions de l'analyse des risques sont les suivantes :

→ Pendant le transfert, la quantité de gaz de radiolyse est faible et la concentration est très inférieure à la LIE dans les galeries même en l'absence de la ventilation en raison du volume libre important dans ces zones ; la hotte de transfert n'est pas considérée étanche aux gaz ce qui permet d'écarter les risques d'accumulation dans son volume interne.

→ La maîtrise du risque d'explosion dans les alvéoles MAVL repose sur la présence d'une ventilation qui maintient le taux d'hydrogène à des valeurs très inférieures à la LIE (fraction de la LIE de l'ordre de 10^{-6}).

→ Les délais disponibles pour rétablir la ventilation en cas d'un arrêt de ventilation avant d'atteindre le critère de 1% d'hydrogène dans l'alvéole sont variables en fonction du type de colis (taux de relâchement d'hydrogène) et du type d'alvéole (nombre de colis par alvéole et volume libre dans l'alvéole). Une évaluation a été effectuée pour une valeur moyenne de 10 l/fût/an et sous l'hypothèse pénalisante que l'hydrogène ne se répartissait pas uniformément mais seulement dans le volume libre en toit d'alvéole ; dans ces conditions, le délai disponible est de l'ordre de 10 jours. Une autre estimation a été réalisée pour une alvéole de colis B4.1 relâchant 100 l/fût/an, toujours sous l'hypothèse d'une stratification de l'hydrogène en toit d'alvéole (la prise en compte d'une stratification dans un volume libre réduit permet d'augmenter les marges de la démonstration de sûreté) ; ces hypothèses abaissent le délai disponible à une valeur inférieure à 6 jours (le faible écart s'explique par un nombre de colis par alvéole inférieur et un volume libre plus important). Les délais d'intervention nécessaires ne peuvent se quantifier qu'en rapport à des situations qui restent à définir, mais il est concevable qu'ils se chiffrent en jours. Ce point est donc à analyser en détail dans le cadre des analyses de risques.

→ Deux situations nécessitent d'être approfondies au regard du risque d'explosion :

- Une explosion à l'intérieur du colis de stockage ;
- Une explosion au sein de l'alvéole de stockage en l'absence de ventilation (panne de la ventilation en exploitation, arrêt volontaire de la ventilation lors des opérations de fermeture des alvéoles de stockage, explosion après fermeture notamment lors d'un retour éventuel dans le cadre d'une demande de réversibilité). (option de sûreté jalon 2009)

En cas de fermeture des alvéoles MAVL ou lors de sa réouverture pour réversibilité, il y a possibilité de formation d'une atmosphère explosive, laquelle est à limiter le plus possible grâce à:

→ L'inertage de la zone en remplaçant le comburant (oxygène) par un gaz inerte (azote 41) ;

→ la recombinaison catalytique de l'hydrogène avec l'oxygène avant d'atteindre la zone d'inflammabilité du mélange ;

→ la consommation chimique de l'hydrogène au moyen de composés (oxydes métalliques, composés organiques et polymères) susceptibles de former des liaisons avec l'hydrogène en faible teneur dans l'atmosphère. (option de sûreté jalon 2009)

L'IRSN considère que la démarche visant à identifier les dispositions nécessaires en matière de maîtrise de la concentration de l'hydrogène dans les zones concernées est satisfaisante. Cependant, la difficulté de modélisation du remplissage des alvéoles devenues passantes (existence de zones mortes ?) nécessite une confirmation des choix techniques par des démonstrateurs d'ouvrages, cf demande ASN (Avis IRSN 2010).

La démarche de l'Andra, qui consiste à exclure les zones à risque d'explosion du dimensionnement au titre de la maîtrise des risques liés à l'explosion, devrait être clarifiée, notamment eu égard à la mise en œuvre d'une approche déterministe (Avis IRSN 2010).

L'Andra s'est engagée à clarifier, dans le dossier accompagnant la DAC, sa démarche d'analyse des risques liés à l'explosion. L'Andra devra définir sur cette base les dispositions visant à maîtriser les risques d'explosion et à en limiter les conséquences, en tenant compte des différentes sources possibles d'inflammation, et des diverses situations de fonctionnement, incluant notamment le cas d'un arrêt de la ventilation. L'ANDRA s'est aussi engagée à justifier, dans le dossier accompagnant la DAC : les durées maximales d'immobilisation des colis émetteurs de gaz de radiolyse en transit ; les durées maximales d'indisponibilité des systèmes de ventilation, afin d'apprécier les risques d'explosion (ces durées devront être définies avec des marges suffisantes) ; le caractère enveloppe des situations à risque d'explosion dans les alvéoles MAVL retenues pour le dimensionnement, en prenant notamment en compte toutes les sources de dégagement d'hydrogène, leur contribution à la formation d'une ATEX, et le cas échéant l'accumulation d'hydrogène dans les singularités des circuits de retour d'air des alvéoles MAVL en cas de panne prolongée de la ventilation.

L'IRSN constate que les éléments avancés par l'Andra en matière de prévention du risque d'explosion dans les alvéoles fermés, scellés ou en cours de fermeture sont relativement préliminaires, et ne permettent pas de conclure quant à la faisabilité technique de leur mise en œuvre. Par conséquent, il conviendra de compléter le dossier accompagnant la DAC sur ce point. (Avis IRSN 2010)

L'IRSN rappelle les engagements de l'ANDRA suite au dossier 2009 qui restent à solder :

- clarifier sa démarche d'analyse des risques liés à l'explosion et à définir sur cette base les dispositions visant à les maîtriser et à en limiter les conséquences, en tenant

compte des différentes sources possibles d'inflammation, et des diverses situations de fonctionnement, incluant notamment le cas d'un arrêt de ventilation

- à justifier le caractère enveloppe des situations à risque d'explosion dans un alvéole MAVL
- à justifier le lieu de charge des batteries et, le cas échéant, l'absence de matériels ATEX dans la cellule de manutention des alvéoles MAVL.

(Rapport Risques IRSN 2014).

L'ASN avait demandé suite au dossier 2005 que « le bien fondé des choix de concepts de stockage soit confirmé par des démonstrateurs d'ouvrages de stockage et des études relatives à la sûreté, notamment pour les dispositifs de ventilation permettant de limiter le risque d'explosion dû à la présence de gaz de radiolyse ». L'IRSN estime donc que cette demande reste d'actualité pour le dossier accompagnant la DAC et que l'adéquation de la ventilation pourra être vérifiée in situ pendant la phase pilote de Cigéo.

L'IRSN souligne que l'ANDRA envisage d'accepter un nombre limité de colis émettant plus d'hydrogène que la valeur retenue pour l'analyse des risques. Pour que de tels colis de stockage soient acceptés dans Cigéo, l'Andra devra démontrer que leur transfert dans l'installation souterraine dans les hottes et leur stockage en alvéole MAVL se fera de manière sûre avec le dimensionnement retenu pour les hottes et la ventilation des alvéoles MAVL.

L'IRSN estime nécessaire de s'assurer que la mesure de la teneur en hydrogène à l'extraction d'air des alvéoles MAVL est représentative. (Rapport Risques IRSN 2014).

II. Rejets en surface :

a) Zone puits

Pas de remarques particulière de l'IRSN pour la sûreté en phase d'exploitation des installations de surfaces sur le plan des principes retenus par l'ANDRA (Avis IRSN 2010).

Seulement pour les puits de ventilation et les puits de transfert du personnel qui seront classés en zone nucléaire.

b) Zone descenderies

Pas de remarques particulière de l'IRSN pour la sûreté en phase d'exploitation des installations de surfaces sur le plan des principes retenus par l'ANDRA (Avis IRSN 2010).

Lors de la réception au terminal ferroviaire.

Lors des transferts, réception, mise en conteneur ou surconteneur de stockage, lors de l'entreposage de transit, mise en hotte ...

Le secteur nucléaire de la zone descenderie représenterait 37 ha (option de sûreté jalon 2009)

Les risques de dissémination proviennent notamment des radionucléides gazeux pour les colis MAVL (tritium, krypton 85 et carbone 14) alors que les colis primaires HA sont en conteneurs étanches. Les rejets standardisés sont estimés à 420 Bq/h/colis en Tritium et Carbone 14, à 7080 Bq/h/colis en Krypton 85.

Eventuellement en cas de réversibilité sur un colis dégradé à compenser par l'utilisation de hotte puis reconditionnement.

En fonctionnement incidentel/accidentel : chute d'un colis, incendie, inondation interne, séisme, chute d'avion ... (option de sûreté jalon 2009)

Limiter les risques lors des opérations de manutention : chutes, collisions ou chocs d'un colis contenant des substances radioactives qui pourraient mener à un relâchement. Les locaux à risques sont les ateliers de déchargement des emballages de transport (colis primaires HA et MA VL), les ateliers d'entreposage de transit des colis de stockage MAVL (empilement potentiel). La limitation se fera par : limiter les hauteurs de levage, transport par voie ferrée plus fiable, espace nécessaire dans les locaux pour les cheminements, sécurisation des systèmes de manutention, suivi des engins de manutention (option de sûreté jalon 2009)

Des capacités d'entreposages sont envisagées mais non impératives : entreposage de décroissance thermique de colis HA (1 ou 2 modules de 725 à 970 m³ avec une puissance thermique de 1 kW par colis), un module d'entreposage de colis HA en soutien à la réversibilité (100 à 500 m³), un module d'entreposage de colis MAVL pour la flexibilité et en soutien à la réversibilité (plusieurs 100taines de m³). (option de sûreté jalon 2009)

L'IRSN estime que les zones présentant des risques particuliers liés à la manutention des colis sont identifiées par l'Andra de manière satisfaisante. L'IRSN considère que les principes de sûreté et les exigences appliquées à certains composants du stockage sont cohérents avec les bonnes pratiques en matière de gestion des risques liés à la manutention dans les installations nucléaires.

Mais l'IRSN attire l'attention sur la nécessité de mettre en cohérence les procédés de manutention envisagés et les exigences de sûreté retenues (hauteur max de 2 m en manutention mais le stockeur à fourche nécessiterait de lever le colis de stockage au moins jusqu'à 3 m). (Avis IRSN 2010).

La hauteur de chute retenue est équivalente à la hauteur d'un colis de stockage, soit environ 2 m. L'Andra prévoit de dimensionner le colis de stockage à cette chute. L'IRSN convient que cette hauteur correspond à la hauteur maximale de chute possible pour un colis de stockage MAVL. (Rapport Risques IRSN 2014).

Les transports sont règlementés, pour une personne restant 1 h à moins de 2 m du véhicule, la dose serait de 0,1mSv maximum. (dossier MO 2013).

c) Chimique et radioactif

1) Chimique :

Rejet d'hydrogène à risque explosif mais non radioactif.

Rejet de méthane dans une très faible proportion, risque explosif mais non radioactif.

Gaz d'échappement des engins diesel acheminant les lorries dans le hall de réception des emballages de transport

Monoxyde et dioxyde de carbone émis par les colis MAVL (radiolyse)

Risques chimiques envisagés :

→ Des gaz toxiques émis par les colis MAVL liés au phénomène de radiolyse, notamment le monoxyde et le dioxyde de carbone émis par les fûts d'enrobés bitumineux ;

→ Des gaz toxiques émis par les procédés ou équipements utilisés (véhicules alimentés avec du gazole lors des opérations de creusement ou lors d'intervention des services de secours) ;

→ Des produits chimiques susceptibles d'être utilisés dans les installations (décapants, produits de nettoyages, huiles moteurs, lubrifiants mécaniques...) et entreposés notamment dans la zone centrale des installations souterraines.

La ventilation limitera l'effet des faibles quantités de gaz susceptibles d'être relâchées, la gestion des produits chimiques sera rigoureuse, et la conception des installations conformes aux exigences de la réglementation technique sur les produits dangereux. (option de sûreté jalon 2009)

L'Andra a confirmé au cours de l'instruction que le confinement des toxiques chimiques pendant la phase d'exploitation est toujours recherché au stade de l'esquisse. Ceci n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN. (Rapport Risques IRSN 2014)

2) Radioactif:

Rejet de radioactivité : limite de dose annuelle retenue par l'ANDRA (2005) moins de 0,25 mSv pour le public (norme réglementaire 1 mSv/an, radioactivité naturelle 2,4 mSv/an).

Exposition interne en cas d'inhalation de gaz radioactifs (colis B) pour un public à 500 m des installations de surface : 1microSv/an (stockage en chargement maximal en colis B). (dossier 2005).

La majorité de l'impact viendra des gaz radioactifs (carbone 14, tritium, krypton 85 ...) provenant de certains colis MAVL ; ils seront gérés par la ventilation selon les limitations de rejets, avec un impact estimé de 0,01 mSv/an à proximité du centre (dossier MO 2013)

- En phase d'exploitation :

→ Protéger les personnes et l'environnement contre la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques :

- Dispositions de contrôle de propreté radiologique des colis à la réception sur site (soit ≤ 4 Bq/cm² en émetteurs β, γ et $\leq 0,4$ Bq/cm² en émetteurs α).

- Dispositions limitant la contamination surfacique des colis de stockage (soit ≤ 4 Bq/cm² en émetteurs β, γ et $\leq 0,4$ Bq/cm² en émetteurs α) sur le site.

- Dispositifs et zonage de confinement des substances radioactives :

- ❖ Dimensionner le confinement statique et dynamique des installations à l'aide de documents normatifs,

- ❖ Maîtriser tout risque de perte de confinement :

- d'origine interne : incendie, criticité, explosion, perte de ventilation, chute, collision,...

- d'origine externe : séisme, chute d'avion, environnement industriel, inondation, ...

- ❖ Maîtriser la dissémination de gaz radioactifs et toxiques et les canaliser vers des exutoires,

- ❖ Maîtriser la venue d'eau sur les colis.

- Dispositifs de surveillance et de traitement le cas échéant :

- ❖ Maitriser les niveaux de contamination des colis et des installations du stockage,

- ❖ Maîtriser les rejets solides, liquides et gazeux.

→ Protéger les personnes contre l'irradiation : Protéger le public des rayonnements ionisants émis par les substances radioactives

- Dispositifs de radioprotection limitant l'exposition du public selon le principe ALARA :

- ❖ Limiter le débit de dose à la clôture, limiter les effets de ciel, notamment dimensionner les bâtiments (ou mettre des compléments éventuels – buttes),

- ❖ Eloigner les personnes des sources radioactives (distance à la clôture),

- ❖ Signaler la présence de l'INB,

- ❖ Maîtriser les risques liés aux évènements externes, liés au vieillissement des bâtiments.

- Dispositifs de surveillance :

- ❖ Mesurer les débits de dose à la clôture,

- ❖ Mettre en place des servitudes.

(option de sûreté jalon 2009)

→ Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage :

- Protéger les déchets HA de l'eau. HA vitrifiés : Empêcher l'arrivée d'eau sur le verre pendant la phase thermique (i.e. tant que la température du verre excède 50 °C). CU3 : Interdire l'arrivée d'eau sur la matrice métallique pendant la phase thermique (i.e. tant que sa température excède 50 °C) Justification du critère de 50 °C : la connaissance du comportement des radionucléides en solution est maîtrisée jusqu'à cette valeur

❖ Conception du colis de stockage et du chemisage :

- Choisir une nuance d'acier et épaisseur favorables à l'étanchéité du surconteneur sur une durée pluriséculaire à millénaire,
- assurer la tenue mécanique du chemisage pendant la phase thermique, pour maîtriser les sollicitations mécaniques du surconteneur (éviter ainsi des chargements ponctuels peu prédictibles et des points de contacts susceptibles de favoriser une corrosion localisée),
- Assurer la tenue du surconteneur aux sollicitations mécaniques sous chargement hydrostatique et avec un dimensionnement à la corrosion tenant compte de la période oxydante que l'on cherche par ailleurs à limiter, de la corrosion uniforme en conditions anoxiques, de l'influence de la radiolyse et des dispositions suivantes prises pour limiter/ rendre prédictible la corrosion,
- Mettre en place des dispositifs évitant les contacts directs chemisage/surconteneur qui créeraient des zones confinées favorables à la corrosion localisée (solution étudiée : les patins en céramique).

❖ Conditions d'exploitation :

Limiter la période oxydante (limiter les échanges gazeux avec la galerie avant la mise en place du bouchon et de son appui en béton).

- Limiter la mise en solution des radionucléides des déchets HA

❖ Conception des matériaux manufacturés et de l'architecture :

- Assurer des conditions d'environnement favorables (température $\leq 50^{\circ}\text{C}$, $7 \leq \text{pH} \leq 9$, critère dépendant du modèle de comportement du verre ; cela limite l'emploi de matériaux cimentaires au voisinage immédiat des déchets), environnement chimique réducteur, environnement physique peu perméable et peu diffusif,
- Limiter les vides dans l'alvéole et l'endommagement de l'argilite en champ proche.

❖ Pendant le creusement :

Maîtriser les techniques de creusement et orienter si nécessaire les alvéoles pour limiter l'endommagement à un niveau compatible avec la faible perméabilité équivalente acceptée au vu des calculs de sûreté.

❖ Pendant l'exploitation :

limiter les chocs pour conserver le taux de fracturation aussi proche que possible du taux initial lié au procédé de production du colis primaire.

- Limiter la mise en solution des radionucléides des combustibles usés CU3

Mêmes exigences que pour les colis HA vitrifiés, à l'exception du critère pH élargi à $7 \leq \text{pH} \leq 10$ (critère dépendant du modèle de dissolution du métal) et à l'exception du critère de taux de fracturation du verre.

- Limiter la mise en solution des radionucléides des déchets MAVL dans les alvéoles de déchets MAVL

❖ Choix du site et des matériaux d'apport :

limiter les interactions chimiques roche – matériaux rapportés (installation et colis) perturbant l'argilite.

❖ Conception de l'architecture :

- Séparer des déchets (maintenir une garde suffisante entre zones ou alvéoles contenant les colis organiques et non organiques),
- Favoriser la stabilité dimensionnelle (minimiser les vides).

- Limiter la mobilité des radionucléides relâchés

❖ Choix d'architecture pour préserver les propriétés de faibles solubilités et sorptions :

- Minimiser le contenu en matières organiques des constituants du stockage et en espèces agressives dans les constituants du stockage,
- Séparer en modules distincts HA/MAVL et, au sein des MAVL, des déchets contenant ou non de la matière organique (susceptible de se dégrader en complexants mobilisateurs), des déchets (présence de sels de nitrate notamment) susceptibles de générer des perturbations (condition oxydante, complexation...).

❖ Conception des matériaux manufacturés :

limiter l'action de transport des colloïdes et des complexants : fermer les alvéoles par un dispositif de faible perméabilité (bouchon d'argile et interruption de la zone endommagée d'argilite).

→ Retarder et atténuer la migration des radionucléides

- Retarder et atténuer le flux longitudinal de radionucléides relâchés dans les ouvrages

❖ Conception d'architecture et matériaux manufacturés :

- Privilégier le flux massique de radionucléides par les galeries le plus faible possible par rapport au flux par l'argilite,

- Maintenir une domination du transport diffusif dans les ouvrages,
- Privilégier la capacité de dispersion du remblai,
- Concevoir des longueurs de galeries suffisantes pour que, par dispersion dans le remblai, les radionucléides aient le temps de gagner l'argilite et d'y diffuser.

- Retarder et atténuer la migration des radionucléides dans la formation hôte du Callovo-Oxfordien

❖ Implantation du stockage :

Préserver une épaisseur de garde d'argilite peu ou non perturbée la plus grande possible et répartie au dessus/au dessous pour la robustesse (garde entre alvéoles de stockage et formations encaissantes 60m, épaisseur de formation hôte > 130m).

❖ Conception des composants manufacturés pour préserver la capacité de sorption et rétention des argilites :

Choisir des matériaux pour préserver les caractéristiques physico-chimiques favorables de la formation hôte (milieu, réduit, sorbant, pH).

2) Conception de l'architecture du stockage :

Choisir une densité de répartition des colis exothermiques pour limiter les sollicitations thermiques de la formation hôte ($T < 90^{\circ}\text{C}$ dans argilite).

(option de sûreté jalon 2009)

→ Dans les installations souterraines en phase d'exploitation, les risques de dispersion de matières radioactives en fonctionnement normal sont liés à :

- La contamination surfacique labile externe des hottes et des colis de stockage

- L'émission de radionucléides gazeux par les colis de déchets (plusieurs colis de type MAVL ne sont pas étanches à certains radionucléides) : tritium, krypton, carbone...

En cas d'incidents, les risques sont plus particulièrement liés à la détérioration des colis de stockage, laquelle peut être due à :

- Une chute ou collision de la hotte lors d'une opération de transfert dans la descenderie, le puits ou les galeries de transfert ;

- Une chute de colis lors de sa mise en alvéole de stockage essentiellement pour les colis MAVL au niveau de la cellule de manutention et de la partie utile de l'alvéole de stockage ;

- un incendie du véhicule de transfert, de la navette ou des équipements de manutention au niveau des alvéoles ;

- une explosion au sein d'une alvéole de stockage MAVL.

Mais aussi à la concomitance stockage/creusement : les zones de travaux seront isolées de la zone nucléaire par des dispositifs (portes, sas...) afin d'assurer les fonctions suivantes :

- le confinement de la zone nucléaire vis-à-vis de la zone en construction dans toutes les situations de fonctionnement ;

- l'évacuation du personnel présent dans les zones du fond en situations accidentelles, notamment l'incendie ;

- la protection radiologique des personnes vis-à-vis des sources radioactives présentes en zone nucléaire.

Dans les installations souterraines, les colis primaires et de stockage constituent un premier confinement statique pour les particules et aérosols radioactifs. Celui-ci est complété d'un deuxième confinement statique assuré par la hotte de transfert. Afin de maintenir un niveau de contamination le plus faible possible dans les installations du fond y compris la descendrie, la contamination surfacique labile des colis de stockage et des hottes est la plus faible possible et en tout état de cause inférieure aux seuils retenus par la réglementation des transports, à savoir une contamination non fixée limitée à 4 Bq/cm² en émetteurs Beta, Gamma et 0,4 Bq/cm² en émetteurs alpha puisque les colis primaires sont aussi limités à cette valeur. Les colis et hottes font l'objet de contrôles périodiques de non contamination.

Certains colis de stockage MAVL sont constitués de colis de déchets qui génèrent de l'hydrogène par radiolyse et ne sont pas étanches par conception. Par conséquent, un relâchement de gaz radioactifs est observé pour certains types de colis MAVL. La nature des gaz radioactifs présents (notamment le tritium, le krypton, le carbone...) ne permet pas, lors d'un transfert de colis et lors de leur stockage, de disposer de mesures de protection. Pour ces cas spécifiques, le niveau d'exposition résiduelle pour les personnes (personnel et public) doit être minimisé et, en tout état de cause, inférieur à des valeurs spécifiées. Cette exposition résiduelle résulte d'une optimisation entre le dimensionnement des systèmes de confinement (notamment la ventilation pour le personnel présent dans les locaux ou la dilution via la hauteur de cheminée pour le public) et la concentration résiduelle en gaz radioactifs susceptible d'être inhalée. Ainsi, le système de ventilation mis en place complète le confinement statique pour minimiser l'exposition interne du personnel et du public. Ce système de ventilation récupère les substances gazeuses, ainsi que les poussières et aérosols le cas échéant, et les extrait.

L'estimation préliminaire de l'impact des installations en fonctionnement normal est basée sur les dégagements gazeux des colis de type B5 (considérés comme 'enveloppe') :

Les radionucléides gazeux sont le tritium, le krypton 85 et le carbone 14 qui présentent respectivement les valeurs de relâchement suivantes : 420 Bq/h/fût, 7080 Bq/h/fût et 420 Bq/h/fût. L'estimation a été réalisée conventionnellement à 500 m du point de rejet en considérant 45 530 colis primaires. Le calcul tient compte des activités radiologiques libérées par les colis et d'un facteur de transfert à l'homme intégrant les trois voies d'atteintes à l'organisme. La dose annuelle estimée est de l'ordre de 4 microSv, inférieure à la valeur de 0,25 mSv retenue dans les objectifs de protection. Dans le cadre des futures études pour l'élaboration de la DAC, il conviendra de disposer d'une meilleure connaissance des rejets réels de l'ensemble des colis MAVL afin d'affiner le calcul présenté. (option de sûreté jalon 2009)

L'IRSN estime que l'ANDRA devra dans la DAC définir les exigences de sûreté associées à la 2^{ème} barrière de confinement statique (colis de stockage, ouvrage de liaison, galerie, porte, sas ...) en particulier en cas de défaillance du colis primaire. (Avis IRSN 2010).

L'IRSN estime que les principes présentés par l'ANDRA sont cohérents avec les bonnes pratiques en usage dans les installations nucléaires en matière de radioprotection. L'IRSN demande à l'ANDRA de justifier pour la DAC que la zone de travaux puisse être considérée comme une zone non réglementée (études d'exposition du personnel sur des postes-références). (Avis IRSN 2010).

L'Andra s'est engagée à la demande de l'IRSN à présenter :

- dans le projet de spécifications préliminaires d'acceptation des colis de déchets joint au DOS, les exigences de confinement assignées aux colis de déchets primaires MAVL suivant qu'ils sont acceptés pour un stockage direct ou pour un stockage en conteneur de stockage ;
- dans le DOS, les fonctions et les performances des conteneurs de stockage ;
- dans le dossier accompagnant la DAC, les dispositions concrètes permettant de satisfaire ces exigences, quelle que soit la solution de stockage envisagée.
- dans le dossier accompagnant la DAC, les modes de stockage retenus ou envisagés pour chaque famille de colis de déchets du programme industriel de gestion des déchets (PIGD). (Rapport Risques IRSN 2014).

L'ANDRA suite à l'avis IRSN 2010, devait définir, dans le dossier accompagnant la DAC, les exigences de sûreté associées à la deuxième barrière de confinement statique (i.e. la hotte de transfert) en prenant en compte notamment la défaillance du colis primaire en tant que première barrière de confinement. L'IRSN souligne maintenant la nécessité de prendre également en compte l'éventualité d'une trappe évoquée par l'ANDRA (pour évacuer les gaz au-delà d'un seuil de concentration en situation incidentelle ou accidentelle). (Rapport Risques IRSN 2014).

L'IRSN encourage l'ANDRA à poursuivre ses études pour démontrer la faisabilité de dispositifs de surveillance et de prélèvement d'échantillons atmosphériques au moyen d'un dispositif téléopéré, notamment à travers la mise en œuvre d'un démonstrateur au cours de la phase pilote de Cigéo. (Rapport Risques IRSN 2014).

L'IRSN rappelle qu'il conviendra de veiller à l'adéquation des dispositions qui seront mises en place pour la surveillance des rejets (gaz, poussières, aérosols) extraits de la zone nucléaire de Cigéo avec les caractéristiques de l'air extrait (taux d'empoussièrement).

L'ANDRA s'est engagée à présenter, dans le dossier accompagnant la DAC, les dispositions techniques et organisationnelles retenues afin de garantir à la fois le maintien des séparations entre les zones nucléaire et de travaux en position fermée en situation normale et le franchissement aisé de ces séparations en situation d'intervention lorsque nécessaire. (Rapport Risques IRSN 2014).

L'IRSN appelle l'attention sur l'importance de la gestion des responsabilités entre les différentes entreprises impliquées dès la construction et pendant l'exploitation de Cigéo.

L'IRSN conclut que :

- les principes de confinement dans les alvéoles MAVL ont été améliorés, en particulier la mise en œuvre d'un confinement dynamique en complément d'un second système de confinement statique ;
- les risques liés à la concomitance des activités, notamment entre les zones d'activités nucléaires et de travaux, ont fait l'objet d'une première évaluation ;

- un « référentiel incendie », qui réunit les exigences à retenir pour la maîtrise des risques liés à l'incendie, a été établi sur la base de références relatives à la sûreté nucléaire et à la sécurité des ouvrages souterrains conventionnels.

Mais que :

- la maîtrise des risques liés à l'incendie, qui constitue un enjeu majeur pour Cigéo en particulier dans les alvéoles MAVL, devra faire l'objet d'un effort substantiel de la part de l'Andra, afin de statuer sur le caractère représentatif des scénarios retenus et sur la suffisance des dispositions visant à contenir ou limiter les relâchements de matières radioactives en provenance des secteurs de feu. L'Andra s'est engagée sur ce point ;

- le REX d'autres installations souterraines de stockage impose de rechercher la mise en œuvre de toutes les dispositions permettant d'éviter une situation accidentelle préjudiciable au retour aux conditions d'exploitation qui prévalaient avant qu'elle ne survienne. Outre le contrôle des colis de déchets avant leur mise en stockage, l'IRSN considère que l'Andra devra établir un programme de surveillance de l'installation permettant notamment de détecter au plus tôt une montée progressive de la température des colis de stockage qui présentent des risques de réactions exothermiques. En tout état de cause, un scénario d'emballement de réactions exothermiques à l'intérieur de plusieurs colis de boues bitumées devra être étudié au titre des ECS, afin d'identifier des dispositions complémentaires nécessaires pour éviter l'occurrence d'un rejet important ou en limiter les conséquences.

L'IRSN considère que le DOS devra présenter l'ensemble des concepts retenus pour la construction de l'installation et le stockage des colis de déchets, leur justification au regard de la sûreté de l'installation pendant la phase d'exploitation et à long terme, ainsi que l'identification des compléments de démonstration et des éléments de qualification qui seront à apporter à l'échéance de la DAC puis lors de la phase industrielle pilote. (Rapport Risques IRSN 2014).

- En phase post fermeture :

En scénario d'évolution normale : 0,022mSv/an au maximum avec les CU ; 0,12 mSv/an en situation très dégradée. (dossier 2005).

Après la fermeture, pas d'impact prévu avant 100 000 ans et de l'ordre de 0,01 mSv en situation normale, ou inférieure à 0,25 mSv en situation dégradée (dossier MO 2013).

→ Contribution des colis de déchets HA aux fonctions de sûreté après fermeture :

- Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage : le colis primaire, notamment la matrice de verre, doit limiter le relâchement des substances radioactives.

- Rester sous critique :

La limitation en matières fissiles peut contraindre le nombre de colis primaires HA dans un colis de stockage.

Les exigences requises pour le colis de stockage pour garantir l'accomplissement de ses fonctions et de celles attribuées à la formation hôte sont décrites ci-après :

- Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par les colis de stockage :

❖ La conception des colis doit prendre en compte la nature des déchets conditionnés avec leurs spécificités (caractéristiques radiologiques, évolution dans le temps), et leurs effets sur les fonctions à assurer.

Le conditionnement des déchets doit permettre de limiter la dissolution des radionucléides. Pour les déchets vitrifiés HA, le verre est retenu comme matrice de confinement compte-tenu de ses caractéristiques intrinsèques qui lui confère une durée de vie importante. Il est retenu un terme source de relâchement conservatif (actuellement, de durée d'environ 300 000 ans). De plus, la maîtrise du terme source dépend de la maîtrise des conditions d'environnement thermique, hydraulique, mécanique, chimique et radiologique (THMCR) dans l'alvéole. Elle renvoie à la nature des matériaux utilisés notamment pour le chemisage (pas de béton dans l'alvéole par exemple) et aux fonctions du système de fermeture de l'alvéole.

❖ Le surconteneur du colis de déchets vitrifiés HA doit protéger le verre d'une éventuelle arrivée d'eau pendant la phase dite « thermique » caractérisée par une température supérieure à 50°C.

Ce surconteneur doit être conçu pour être étanche, sa durée d'étanchéité doit permettre d'éviter un relâchement de radionucléides aussi longtemps que la température ne permet pas de rendre compte, de manière fiable, du comportement des radionucléides, compte tenu des limites actuelles des connaissances (50°C).

Pour garantir une étanchéité, la qualité de la soudure du couvercle doit être garantie et donc vérifiée avant sa mise en stockage.

❖ Les couplages induits par la thermique du stockage, potentiellement importants, doivent être pris en compte et si nécessaire réduits par les dispositions de conception suivantes :

- limiter la température des colis entrant dans le stockage,
- espacer les colis, si nécessaire, par des intercalaires de conception similaire aux colis de stockage, pour ne pas dépasser la limite admissible sur l'argilite ($T < 90^\circ\text{C}$).

Pour les architectures considérées (qui assurent une limitation à 90°C du pic thermique dans l'argilite), la durée de la phase thermique est de l'ordre du siècle pour les colis types C0 et de quelques siècles pour les colis types C1 ; elle pourrait être de l'ordre du millénaire pour les colis de type C6, déchets vitrifiés UOX-MOX-URE.

Pour empêcher les transferts en ambiance thermique et maîtriser les effets de la température sur les spéciations et modes de migration des radionucléides, en réponse à la fonction « limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage », la conception prévoit la mise en place d'un surconteneur en acier non allié d'une épaisseur suffisante. En outre, l'épaisseur retenue inclut un dimensionnement lié à la réversibilité.

- Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par la formation hôte :

❖ Limiter les sollicitations thermiques :

La densité de puissance thermique dans les alvéoles et au niveau de la zone de stockage (puissance thermique des colis, nombre des colis par alvéole) doit être limitée pour que la température de la roche hôte ne dépasse pas la limite admissible garantissant l'absence de phénomènes irréversibles.

❖ Limiter les perturbations radiolytiques :

L'épaisseur du surconteneur des colis HA doit réduire le débit de dose sur la roche à l'extrados du surconteneur, ce qui contribue à limiter la corrosion et ce faisant limite la production de gaz de radiolyse.

❖ Préserver les propriétés mécaniques :

La composition, la conception, la fabrication et le comportement à long terme du colis de stockage doivent minimiser la présence et la formation de vides résiduels dans l'alvéole de stockage (vides entre le colis de stockage et l'alvéole et vides entre le colis de stockage et le colis primaire) et contribuer ainsi à limiter dans le temps les déformations dans la formation des argilites du Callovo-Oxfordien.

❖ Préserver les propriétés chimiques de sorption et de précipitation :

Les colis de stockage ne doivent pas être composés de matériaux susceptibles de dégrader les propriétés chimiques des argilites.

❖ Préserver les propriétés hydrauliques et de transport :

- - Les colis de stockage ne doivent pas être composés de matériaux susceptibles de dégrader les propriétés hydrauliques et de transport des argilites (ex : l'acier ne modifie pas ou peu la composition géochimique des eaux interstitielles).
- - Les colis de stockage participent à cette fonction en assurant une tenue mécanique qui permet de limiter l'extension de la zone endommagée.

-Description de l'option retenue : le surconteneur HA :

Le surconteneur est constitué d'une virole en acier non allié de 55 mm d'épaisseur. Le colis de stockage est doté de patins en céramique inerte évitant un contact direct acier/acier entre le surconteneur et le chemisage des alvéoles de stockage (notamment pour éviter un effet galvanique). Pour répondre à l'exigence sur la limitation de l'endommagement de la roche, l'épaisseur du patin est limitée afin de réduire les jeux fonctionnels et donc minimiser les vides.

L'épaisseur d'acier devra permettre : de limiter le débit de dose à l'extrados du colis pour rendre la corrosion radiolytique prédictible et faible ou du même ordre de grandeur que la corrosion en conditions réductrices ; de résister à la pression d'eau appliquée au cours du temps sur le colis, qui pourra atteindre la pression hydrostatique à la profondeur du stockage.

L'épaisseur d'acier retenue (au stade actuel 55 mm) devra couvrir l'ensemble des colis types exothermiques. Pour certaines catégories de colis, moins irradiants et moins exothermiques, comme par exemple les colis de type C0 et CU3, l'épaisseur pourra être moindre.

La maîtrise des conditions d'environnement du surconteneur est nécessaire pour que ce composant puisse remplir ses fonctions sur la durée requise. Elle renvoie donc aux fonctions du système de fermeture de l'alvéole qui comprend un bouchon métallique (ou capot d'étanchéité), un bouchon argileux et un bouchon en béton. (option de sûreté jalon 2009)

→ - Contribution des colis de déchets MAVL aux fonctions de sûreté après fermeture :

- Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage :

Le colis de stockage contribue à générer un environnement chimique favorable à l'immobilisation dans l'alvéole des substances radioactives.

- Rester sous-critique :

Le nombre de colis primaires dans un colis de stockage doit être limité pour que la masse critique ne soit pas dépassée de façon à garantir l'absence de risque de criticité à l'intérieur du colis de stockage en phase après fermeture.

Les exigences requises pour le colis de stockage pour garantir l'accomplissement de ces fonctions et de celles attribuées à la formation hôte sont les suivantes :

- Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par les colis de stockage :

❖ La conception du colis de stockage doit prendre en compte la nature des déchets conditionnés avec leurs spécificités (caractéristiques radiologiques, évolution du déchet dans le temps...) et leur effet sur les fonctions à assurer.

Le conditionnement, les taux de vide, la présence d'organiques, de complexants, le relâchement de gaz et les propriétés intrinsèques des colis de stockage sont les caractéristiques prépondérantes dans le choix des options de conception afin d'assurer l'accomplissement des fonctions de sûreté en phase après fermeture.

❖ Le conditionnement des déchets doit permettre de limiter la dissolution des radionucléides. Un environnement alcalin réalisé par un béton apparaît globalement favorable à la limitation du relâchement de radionucléides vers le milieu géologique,

❖ La conception du colis de stockage doit permettre de préserver les qualités techniques du béton ($T < 70^{\circ}\text{C}$).

- Exigences vis-à-vis des fonctions assurées par la formation hôte :

❖ Limiter les sollicitations thermiques :

Pour les colis de stockage MAVL exothermiques, la puissance thermique des colis primaires doit être limitée pour que la température de la roche hôte ne dépasse pas, que ce soit en phase d'exploitation ou en phase après fermeture, la limite admissible garantissant l'absence de phénomènes irréversibles. Le nombre de colis de stockage et donc la densité de puissance thermique dans les alvéoles et au niveau de la zone de stockage doivent être limités pour que la température de la roche hôte ne dépasse pas la limite admissible de 90°C à ce stade garantissant l'absence de phénomènes irréversibles.

❖ Préserver les propriétés mécaniques :

La composition, la conception, la fabrication et le comportement à long terme du colis de stockage doivent minimiser la présence de vides résiduels dans l'alvéole de stockage (vides entre le colis de stockage et l'alvéole et vides entre le colis de stockage et le colis primaire) et contribuer ainsi à limiter dans le temps les déformations de la formation hôte.

❖ Préserver les propriétés chimiques de sorption et précipitation :

- La perturbation des propriétés chimiques de sorption et de précipitation de la formation hôte par l'environnement chimique résultant de la composition des colis de stockage doit être limitée à la zone endommagée géo-mécaniquement.
- Les caractéristiques des colis doivent être prises en compte : les quantités en matières organiques et complexants doivent être minimisées et la non possibilité de les séparer en modules dédiés, le cas échéant, sera justifiée.

❖ Préserver les propriétés hydrauliques et de transport :

Le colis de stockage ne participe pas directement à cette fonction. Sa tenue mécanique contribue néanmoins à limiter les déformations de la roche.

❖ La conception en lien avec le mode de manutention doit limiter le taux de vide de l'alvéole après fermeture qui influence le comportement de la zone endommagée, et en conséquence les propriétés hydrauliques et de transport.

- Description de l'option retenue

Un conteneur de stockage de conception générique en béton est privilégié, ce qui permet de contribuer à un environnement chimique favorable à la limitation du relâchement des radionucléides.

La minimisation des vides est privilégiée car la présence de vide peut influencer le comportement à long terme de la zone endommagée.

Le colis est doté de cloisons internes qui ménagent des logements ajustés à la forme des colis primaires. Dans ce cas, le jeu entre le diamètre intérieur de chaque logement et le diamètre extérieur du colis primaire est suffisamment grand (jeu fonctionnel) pour assurer la mise en place des colis primaires et suffisamment petit (faible vide résiduel) pour ne pas nécessiter de comblement après la mise en place du colis primaire.

(option de sûreté jalon 2009)

→ Contribution du milieu géologique aux fonctions de sûreté après fermeture :

Les formations encaissantes (supérieures et inférieures), ne se voient attribuer aucune fonction de sûreté. Les encaissants interviennent dans les évaluations au titre de voie de transfert des radionucléides vers la surface, ce sont en premier lieu leur représentation globale dans le scénario d'évolution normale, ainsi que les paramètres relatifs au transport (convectif et diffusif) qui sont importants, ainsi que leur évolution dans le temps (évolutions géodynamiques et géomorphologique). Aucune propriété de rétention chimique ne leur est affectée, leur géochimie ne présente donc pas la même importance que celle du Callovo-Oxfordien, au regard de la sûreté. Leurs caractéristiques en tant qu'aquifères sont néanmoins importantes pour le choix d'exutoires du scénario d'évolution normale. C'est en fonction des possibles ressources en eau dans les encaissants que sera définie la position des prélèvements d'eau qui alimentent le ou les groupe(s) de référence hypothétique(s) utilisé(s) en vue des calculs d'impacts.

-Fonctions/exigences de sûreté

Les exigences à garantir portent ainsi plus particulièrement sur la formation hôte, c'est elle qui contribue aux fonctions de sûreté. En effet, les caractéristiques à considérer pour l'accomplissement des fonctions de sûreté résultent des caractéristiques intrinsèques de la formation hôte favorables à leur réalisation.

Les fonctions de sûreté auxquelles la formation hôte participe sont les suivantes : isoler les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines

- ❖ La formation hôte doit se trouver à une profondeur assurant la protection du stockage contre les phénomènes de surface ; le guide de sûreté situe la profondeur minimale requise de ce point de vue à environ 200 m.

- ❖ Le site de stockage ne doit pas contenir des ressources souterraines exceptionnelles extractibles susceptibles de susciter des travaux de prospection.

- Les exigences à considérer pour l'accomplissement de ces fonctions sont les suivantes :

- ❖ La formation hôte doit être peu perméable à l'eau, homogène sur le plan horizontal et ne doit pas présenter de fractures hydrauliques.

- ❖ La formation hôte doit être d'une épaisseur permettant de limiter et retarder la migration des radionucléides, en tirant parti de la décroissance radioactive et de l'atténuation apportée par l'étalement des radionucléides.

❖ L'extension horizontale de la formation hôte doit être suffisante pour implanter des zones de stockage suffisamment espacées afin de réduire les contraintes thermiques et mécaniques sur la formation hôte.

❖ La formation hôte doit résister aux sollicitations hydraulique, thermique, mécanique, chimique et radiologique générées par les activités de construction et d'exploitation du stockage. Selon le principe d'itération, la conception du stockage utilise la connaissance acquise pour prendre en compte et limiter les sollicitations à un niveau compatible avec la préservation des caractéristiques de la formation hôte mobilisées pour les fonctions de sûreté. La préservation, par la conception, des propriétés favorables de l'argilite autour des ouvrages, notamment des alvéoles et des modules, est abordée ci-après :

- La formation hôte doit évacuer la puissance thermique dégagée par les déchets exothermiques en résistant aux sollicitations thermiques générées par le stockage des déchets considérée à une intensité imposée par les options de conception du stockage de déchets retenues (température dans l'argilite maintenue strictement inférieure à 90°C). La capacité de dissipation résulte notamment d'une caractéristique intrinsèque de la formation hôte, la conductivité thermique. Cela induit une exigence de dimensionnement : espacement des alvéoles HA entre elles et des colis HA dans les alvéoles de façon à respecter les critères thermiques et les espacements des zones afin de limiter leurs interactions thermiques.
- La formation hôte doit résister aux déformations mécaniques aux limites imposées par les activités de construction et d'exploitation des ouvrages et par les exigences de conception et de sûreté.
- La formation hôte doit résister aux perturbations chimiques aux limites imposées par les exigences de conception et de sûreté.

- Description de la formation du Callovo-Oxfordien vis-à-vis des fonctions et exigences précédentes

Cette description/ justification du respect des exigences tient compte des acquis du programme de reconnaissance conduit sur la zone de transposition depuis 2005 et des acquis au laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne qui ont conforté les caractéristiques favorables de la formation hôte et des formations encaissantes annoncées dans le Dossier 2005.

Les connaissances acquises en 2007 et 2008 confirment la validité de l'ensemble des paramètres « enveloppes » qui avaient été définis pour les évaluations de sûreté du Dossier 2005.

Le jalon 2009 correspond à la proposition au gouvernement, après concertation avec les élus locaux et le CLIS d'une ZIRA (Zone d'Intérêt pour une Recherche Approfondie) au sein de la zone de transposition à l'intérieur de laquelle serait implanté le stockage. Cette description fait état, le cas échéant, des éléments associés au choix de la ZIRA.

❖ Isoler les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines :

- sur toute la zone de transposition, la formation hôte se trouve à une profondeur supérieure à 400 m ce qui permet de satisfaire à l'exigence de la profondeur nécessaire mentionnée

dans le guide de sûreté pour assurer la protection du stockage contre les phénomènes d'érosion en surface,

- la formation hôte est exempte de ressources naturelles pouvant inciter une intrusion humaine sur toute la zone de transposition et en particulier sur la ZIRA ; les résultats du programme profond indiquent un potentiel géothermique réduit.

❖ Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage

:

la formation hôte participe à cette fonction par les caractéristiques de ses eaux interstitielles qui influencent la rétention chimique au sein du stockage en particulier les alvéoles. Les expérimentations en laboratoire souterrain confirment le caractère réducteur et un pH proche de la neutralité : Les caractéristiques géochimiques de la formation sont précisées, notamment grâce aux résultats de l'expérimentation PAC (Prélèvements pour Analyse Chimique) qui a permis de vérifier la validité du modèle de composition géochimique de l'eau interstitielle du Callovo-Oxfordien. Un pH neutre et une eau réductrice comme le laissait penser la présence de pyrite et de matière organique ont été confirmés. Dans ces conditions, de nombreux radionucléides présentent une faible solubilité dans l'eau, c'est le cas par exemple des actinides (famille de l'uranium).

❖ Retarder et atténuer la migration des radionucléides :

la formation hôte contribue à cette fonction par ses caractéristiques intrinsèques. Les résultats des expérimentations en laboratoire souterrain et du programme de reconnaissance confortent ces caractéristiques :

- - La formation hôte a une épaisseur de 140 m minima dans la ZIRA retenue et les acquis du programme de reconnaissance consolident l'homogénéité latérale de la formation. L'épaisseur de couche varie de manière régulière du sud vers le nord est, la position de la ZIRA privilégie une épaisseur de garde minimale de 60 m de part et d'autre du stockage lorsque l'implantation est en zone médiane de la couche du Callovo-Oxfordien. Elle permet de répondre à l'exigence de sûreté d'une épaisseur minimale de 60 m. Les phénomènes de diagénèse enregistrés par le Callovo-Oxfordien sont très discrets et d'extension régionale. Le résultat des observations révèle qu'ils ne sont pas la cause d'hétérogénéités à l'échelle de la zone de transposition.
- - Les caractéristiques hydrauliques et de transport de la formation hôte sont confortées par les résultats de la campagne de forage sur la zone de transposition. Des profils de perméabilité, porosité, coefficients de diffusion sont consolidés par ces mesures.
- - La distribution des éléments mobiles obtenus sur échantillons montre que le transport des éléments chimiques se fait très lentement par diffusion. Elle est confortée par l'interprétation des expériences de diffusion réalisées sur échantillons ou in situ (expérience DIR, Diffusion et Rétention). Les valeurs sont cohérentes avec celles obtenues au stade du Dossier 2005, elles permettent de retenir comme valeurs de référence un coefficient de diffusion de $2,5 \cdot 10^{-11}$ mètres carrés par seconde (m^2/s) pour l'eau tritiée et $5 \cdot 10^{-12}$ m^2/s pour les espèces

anioniques (iode et chlore notamment). Il est de plus rapporté une très faible variabilité de ces valeurs sur toute la hauteur de la formation hôte.

- - La capacité de rétention des radionucléides est confirmée par les essais de diffusion d'espèces cationiques (tel que le césium) tant in situ dans le laboratoire souterrain qu'en laboratoire de surface selon différentes configurations expérimentales (chimie de l'eau, teneur de l'élément en solution). Les principaux éléments étudiés sont l'iode, le technétium, le césium, le sélénium, le bore, le chrome, le nickel, le zirconium, le niobium, le molybdène, l'étain, le plomb, l'uranium, le neptunium, et le plutonium. (option de sûreté jalon 2009)

→ - Contribution de l'architecture aux fonctions de sûreté après fermeture :

- Isoler les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines :

L'architecture contribue à limiter les effets de potentielles intrusions humaines, notamment par un fractionnement modulaire qui limite l'inventaire mobilisable en cas d'intrusion involontaire.

- Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage :

L'architecture contribue à cette fonction par la conception d'alvéoles de stockage adaptées aux caractéristiques des colis de déchets (nature des matériaux favorisant l'immobilisation des radionucléides et/ou préservant la matrice des déchets).

- Retarder et atténuer la migration des radionucléides :

L'architecture des installations souterraines contribue à favoriser la diffusion comme mode dominant de migration des radionucléides dans la formation hôte, de façon à tirer parti de la décroissance radioactive.

A la demande de l'IRSN, l'Andra devra évaluer, dans le dossier accompagnant la DAC, la sûreté en phase d'exploitation et de post-fermeture de l'option de conception qui sera retenue pour les colis de déchets MAVL vitrifiés.

L'IRSN considère que la recommandation du groupe permanent relative au dimensionnement des composants métalliques de l'alvéole HA mentionnée « préciser le dimensionnement des composants métalliques du stockage (chemisage des alvéoles et (sur)conteneurs) » reste d'actualité. (Avis IRSN 2010)

L'IRSN constate que l'état des connaissances relatives à la zone endommagée liée à l'excavation des ouvrages est encore parcellaire et estime qu'en l'absence de progrès suffisants réalisés d'ici 2015, il conviendrait que l'Andra retienne, dans l'évaluation de sûreté qui sera présentée dans le dossier accompagnant la DAC, l'approche prudente présentée dans le Dossier 2005 qui consiste à considérer une zone endommagée non cicatrisée. De plus, l'IRSN souligne que la réalisation de démonstrateurs reste nécessaire pour faire progresser cet état de connaissances. (Avis IRSN 2010)

L'Andra s'est engagée à présenter, dans le dossier accompagnant la DAC, une analyse comparative des techniques de creusement intégrant notamment le retour d'expérience issu du laboratoire souterrain et justifier, sur cette base, celles qui seront retenues pour le creusement des ouvrages du futur stockage. Mais aussi : le mode de croisement de galeries et son dimensionnement et vérifier leur adéquation avec les exigences de sûreté en phase de post-fermeture. Et enfin : les incertitudes concernant le transfert de gaz et le processus de resaturation du stockage et préciser la manière dont elles sont prises en compte dans l'évaluation de sûreté de cette installation.

A la demande de l'IRSN, l'Andra devra justifier, dans le dossier accompagnant la DAC, que la solution technique retenue pour le bouchon d'alvéole HA bénéficie de suffisamment d'éléments probants quant à sa faisabilité industrielle et est bien en adéquation avec les exigences de sûreté en phase d'exploitation et en phase de post-fermeture, mais aussi l'option de scellement de la descenderie et évaluer la robustesse de ce concept en termes de faisabilité et de performance globale. (Avis IRSN 2010)

Ainsi, en parallèle de la poursuite des études visant à aboutir à la qualification des concepts retenus à ce jour par l'Andra pour les scellements, l'IRSN recommande que l'Andra présente des concepts de référence plus simples que ceux actuellement retenus, et pour lesquels suffisamment d'éléments probants quant à la démonstration de leur faisabilité industrielle pourront être réunis à l'échéance de la DAC. Les performances minimales de ces concepts devront être déterminées, en tenant compte de la présence de l'EDZ et des effets éventuels des gaz, pour les diverses situations de fonctionnement du stockage et en particulier, le degré de saturation du noyau, compte-tenu des incertitudes sur le processus de resaturation naturelle. A cet égard, l'IRSN recommande que l'Andra évalue l'intérêt de procéder, ou non, à la resaturation artificielle des scellements lors de leur mise en place. (Avis IRSN 2010)

d) Ventilation

Séparation des circuits de ventilation nucléaire / non nucléaire

Ventilation nécessaire d'ensemble de 500 à 650 m³/s, 10m³/s dans les galeries de transfert de colis, 2m³/s dans les galeries d'accès pour la zone C, ventilation de 3m³/s dans les alvéoles de déchets B (pour diluer l'hydrogène et les gaz radioactifs) (dossier 2005).

2 puits sont exclusivement réservés au retour d'air, un puits est dédié spécifiquement à la zone MAVL, le 2nd prend en charge les autres zones de stockage et l'ensemble des infrastructures. Les puits de travaux et personnel permettent l'alimentation des installations souterraines en air frais (option de sûreté jalon 2009)

Les tunnels horizontaux de la zone MAVL sont 'passants' pour permettre l'évacuation des gaz radioactifs ou explosifs en fonctionnement normal pendant la phase d'exploitation. Il y a une 'galerie de retour d'air' périphérique à chaque sous zone et qui recueille l'air issu des alvéoles dans un compartiment dédié qui est connecté à un puits de retour d'air spécifique de la zone MAVL. Les flux d'air des travaux sont recueillis dans un 2nd compartiment de la galerie de retour d'air et évacués via le puits de retour d'air de la zone MAVL. (option de sûreté jalon 2009)

Pour les alvéoles MA-VL, des filtres THE limite la dispersion des particules radioactives (dossier MO 2013).

1) En cas d'incendie :

La ventilation n'est pas mobilisée par des opérations d'inversion de la ventilation, mais seulement par la possibilité d'augmenter si nécessaire le flux d'air au niveau du lieu de l'incendie de manière à s'assurer du contrôle du sens d'évacuation des fumées.

-Le désenfumage est conçu pour pousser les fumées vers des trappes d'extraction implantées sur le circuit de retour d'air

-les fumées liées à un incendie en zone « travaux » sont évacuées par les gaines (ou compartiments de galerie) dédiées du retour d'air « travaux » ;

-les fumées liées à un incendie en zone «nucléaire » sont évacuées par les gaines (ou compartiments de galerie) dédiées au retour d'air « nucléaire », et séparées physiquement des gaines de retour « travaux » ;

-un incendie en alvéole MAVL est un cas particulier pour lequel un arrêt de ventilation est prévu avec fermeture des clapets coupe-feu. (option de sûreté jalon 2009)

Pas de remarques particulière de l'IRSN pour la sûreté en phase d'exploitation des installations de surfaces sur le plan des principes retenus par l'ANDRA

L'Andra s'est engagée à présenter, dans le dossier accompagnant la DAC, l'ensemble des principes de désenfumage retenus, ainsi qu'une justification de l'efficacité du concept de désenfumage retenu. L'Andra devra aussi justifier l'adéquation des systèmes de désenfumage aux objectifs liés à l'évacuation du personnel, à la protection des équipes d'intervention, et à la protection des « cibles de sûreté » pour l'ensemble des zones du stockage. (Avis IRSN 2010).

Les principes de conduite de la ventilation en situation d'incendie ont été précisés par l'Andra depuis le « Dossier 2009 ». L'Andra indique qu'en l'absence de dissémination de matières radioactives, une ventilation de désenfumage est mise en œuvre, à savoir (i) pour les descenderies, le maintien à débit nominal de la ventilation dans la section pour la maîtrise de la propagation ascendante des fumées et (ii) pour les galeries d'accès et de liaison, le basculement en mode désenfumage dans le compartiment impacté (extraction des fumées dans le compartiment et transfert d'air depuis les galeries situées en amont et en aval du sinistre). Les options de conception et les dispositions concrètes de mise en œuvre du désenfumage des descenderies et des galeries ne sont toutefois pas présentées au stade de l'esquisse. L'Andra s'était engagée à l'issue de l'instruction du « Dossier 2009 » à présenter, dans le dossier accompagnant la DAC, l'ensemble des principes de désenfumage et à justifier d'une part l'efficacité du concept de désenfumage retenu, d'autre part l'adéquation de ces systèmes de désenfumage aux objectifs liés à l'évacuation du personnel, à la protection des équipes d'intervention et à la protection des cibles de sûreté pour l'ensemble des zones de stockage. Cet engagement, pris par l'Andra pour le dossier accompagnant la DAC, reste donc à solder.

L'ANDRA s'est engagée à présenter, dans le DOS, les dispositions de maîtrise des relâchements de matières radioactives en provenance des secteurs de feu, en cas d'incendie dans la partie utile ou la cellule de manutention des alvéoles MAVL. (Rapport Risques IRSN 2014).

2) En cas de perte de ventilation :

Il pourrait y avoir une perte du confinement dynamique (cascade de dépressions dans les différents locaux), perte de la filtration des rejets, «échauffement des colis et de l'air ambiant, risque d'explosion dans les locaux contenant des colis émetteurs d'hydrogènes ». Limitation par : surveillance et prévention, systèmes de détection ... (option de sûreté jalon 2009)

L'Andra s'est engagée à considérer, dans son analyse de l'origine des risques liés à la perte des moyens de contrôle et de surveillance, la perte des systèmes de ventilation. (Avis IRSN 2010).

3) Dans les installations souterraines en phase d'exploitation, la ventilation participe à l'accomplissement des fonctions de sûreté suivantes :

- Confiner la radioactivité pour se prémunir contre le risque de dispersion :

❖ La ventilation assure le confinement dynamique des gaz radioactifs émis par les colis de stockage en situation normale de fonctionnement, dans les installations souterraines, notamment dans les alvéoles de stockage MAVL.

❖ La ventilation assure les fonctions de refroidissement et de conditionnement requises pour le bon fonctionnement des dispositions mises en œuvre au titre du confinement des matières radioactives. Ces fonctions doivent aussi être assurées dans les zones de l'installation où :

- du personnel doit intervenir ou séjourner en maintenant une concentration en oxygène, un taux d'humidité et une température compatibles avec les critères requis pour ce poste de travail ;
- des équipements participant à la sécurité et la sûreté des installations sont installés en maintenant notamment des températures compatibles avec leur bon fonctionnement.

❖ La ventilation assure le confinement dynamique des substances radioactives relâchées par un colis de stockage en situation accidentelle (perte de confinement) dans les zones pour lesquelles le confinement statique ne serait pas suffisant.

❖ Les gaines et galeries de ventilation assurent le confinement statique des substances radioactives extraites des zones pouvant être contaminées en situation accidentelle de fonctionnement.

❖ La ventilation doit éviter la propagation des effets des agressions d'origine interne ou externe qui peuvent porter atteintes au confinement des substances radioactives.

-Protéger les personnes contre l'irradiation :

Les composants de la ventilation, notamment les gaines et galeries de ventilation transportant des gaz et substances radioactives et les filtres, ne doivent pas générer des risques non maîtrisés d'irradiation des personnes.

-Evacuer les gaz de radiolyse :

La ventilation assure l'évacuation des gaz de radiolyse émis par les colis de stockage en situation normale dans les ouvrages de liaison surface/fond, les infrastructures de liaison et la zone de stockage MAVL.

- Assurer la sûreté vis-à-vis du risque de criticité :

Les composants de la ventilation, notamment les gaines et galeries de ventilation et les filtres, ne doivent pas être le lieu d'accumulation de matières fissiles pouvant générer des risques de criticité.

-Evacuer la puissance thermique des colis de déchets :

❖ La ventilation des galeries et des alvéoles MAVL contribue à l'évacuation de la puissance thermique des colis de stockage placés dans les alvéoles sans qu'elle soit requise pour cette fonction ; le respect des critères thermiques doit être assuré par conception des alvéoles et modules, via l'ajustement des densités de stockage aux capacités de dissipation de la chaleur dans l'argilite.

❖ Concernant les colis MAVL, l'évacuation de la puissance thermique des colis vise à garantir les caractéristiques du colis et de l'alvéole ainsi que la tenue des équipements présents dans l'alvéole et à proximité (cellule de manutention, local filtration).

❖ Concernant les colis HA, elle vise à garantir le bon fonctionnement des équipements (capteurs, matériels électriques et électroniques ...) implantés dans les galeries de liaison et d'accès aux alvéoles.

Les exigences à considérer pour garantir l'accomplissement de ces fonctions sont les suivantes :

- Le confinement dynamique implique la mise en œuvre de dispositions pour assainir, épurer et surveiller l'air des zones devant être confinées. Les rejets de gaz et substances radioactives vers l'environnement doivent être les plus faibles possibles et doivent être comptabilisés ;

- Les systèmes de ventilation doivent être conçus pour éviter, en permanence, la dissémination des gaz radioactifs et des substances radioactives dans l'installation (limitation des fuites) ;

- La redondance, la diversité et la fiabilité des composants des systèmes de ventilation doivent être fixées en fonction des risques de dissémination de substances radioactives, qu'ils résultent de défaillance directe ou indirecte de ces composants ;

- Le dimensionnement au séisme des systèmes de ventilation nucléaire ou importants pour la sûreté de l'installation (en regard de la conséquence de leur défaillance en cas de séisme) est requis ;

- La ventilation doit assurer la sectorisation des effets des agressions d'origine interne ou externe et principalement l'incendie. Toutefois, cette sectorisation ne doit pas être réalisée au détriment de la fonction de confinement requise en situation normale ou accidentelle ;

- Les objectifs de radioprotection et la limitation de l'exposition externe du personnel associée à la démarche ALARA doivent être respectés par la définition et le dimensionnement, si nécessaire, d'écrans de protection radiologique permettant de réduire les doses provenant des composants de la ventilation (gainés, galeries et filtres) ;

- La ventilation doit évacuer les gaz de radiolyse et être conçue de sorte que le risque d'explosion soit exclu :

- ❖ Dans les zones de relâchement des gaz (hottes de transfert, galeries et alvéoles) ;

- ❖ Dans les composants des systèmes de ventilation ;

- ❖ Dans les parties de l'installation où sont installés les composants des systèmes de ventilation. (option de sûreté jalon 2009)

L'IRSN estime que les débits d'air indiqués par l'ANDRA de 1 à 2 M de m³/h ne permettent pas d'envisager une filtration THE totale de l'installation, car un étage de filtration THE fonctionne pour un débit ne dépassant pas 1500 m³/h, ce qui obligerait à en installer plus d'un millier en parallèle pour tout l'espace souterrain. L'IRSN demande donc à l'ANDRA de préciser les dispositions de confinement dynamique de l'activité pouvant être relâchée en cas de défaillance du confinement statique selon les secteurs.

L'IRSN considère de plus que l'ANDRA devra pour la DAC présenter les critères de températures retenus et le rôle dévolu aux systèmes de ventilation pour respecter ces critères. (Avis IRSN 2010).

L'ANDRA a finalement prévu une admission d'air dans chaque alvéole par transfert depuis la galerie d'accès, un transfert en pleine section dans l'alvéole de façon longitudinale, une collecte en fond d'alvéole dirigée vers un niveau de filtration THE (propre à chaque alvéole), avec une extraction en surface par des ventilateurs communs à l'ensemble de la zone nucléaire. Ceci répond à la demande de l'ASN après l'instruction du dossier 2009 mais l'IRSN souligne que l'environnement souterrain et les poussières de ciment pourront colmater très rapidement les filtres THE au niveau de chaque alvéole et donc nécessiter des changements relativement fréquents. Aussi l'IRSN appelle l'attention sur l'intérêt de mettre en place des dispositions complémentaires afin de se prémunir du colmatage précoce (mise en place d'une pré-filtration de type moyenne efficacité ME). (Rapport Risques IRSN 2014).

L'IRSN renouvelle sa demande de 2009 quant aux modalités de pilotage de la ventilation et les dispositifs prévus pour ajuster les paramètres de ventilation et équilibrer le réseau dans toutes les situations de la phase d'exploitation et de réversibilité du stockage. (Rapport Risques IRSN 2014).

III. Eau :

a) Récupération lors du creusement (descenderies et galeries) et pendant l'exploitation

Les eaux du labo : les eaux pluviales, usées, de ruissellement ou remontées des installations souterraines sont traitées dans des bassins de décantation avant d'être rejetées dans le ruisseau de la Bureau (doc ANDRA étude de danger 2009)

Pendant la phase d'exploitation, l'installation génère des volumes faibles d'effluents liquides et gazeux, ainsi que de déchets solides.

Un réseau de collecte des effluents issus de la récupération des eaux d'infiltration sera prévu. Un système séparatif des eaux en fonction de sa provenance pourra être choisi :

- Un réseau de collecte, récupérant les eaux au bas de la descenderie, puits et galeries de la zone en construction ou en appui de la zone nucléaire ;
- un réseau de collecte, récupérant les eaux au bas de la descenderie, des puits de ventilation et galeries de la zone en exploitation ;
- un réseau de collecte inférieur recueillant les eaux au bas des alvéoles de stockage MAVL.

La collecte des eaux se fait par des caniveaux de façon gravitaire. Leur évacuation jusqu'à la surface diffère en fonction de sa provenance. Il peut s'agir soit d'un système de relevage par tuyauteries, soit de cuves spécifiques remontées à la surface pour un traitement dédié.

L'ANDRA a pour objectif de protéger les eaux souterraines des horizons aquifères traversés contre une éventuelle pollution lors du creusement (option de sûreté jalon 2009)

S'opposer à la circulation d'eau :

→ Limiter le débit d'eau provenant des formations géologiques sus-jacentes, traversées par les ouvrages d'accès = Limiter les flux d'eau susceptibles d'être drainés dans les formations sus-jacentes

- Implanter le stockage à distance de voies privilégiées de circulation d'eau.
- Conception de l'architecture et des scellements pour limiter les débits d'eau au droit d'aquifères plus perméables traversés par les ouvrages de liaisons surface-fond :

❖ Limiter les connexions hydrauliques entre les aquifères plus perméables et les argilites : mise en place d'un « dispositif de séparation des aquifères plus perméables » (répond également à des exigences de la loi sur l'eau),

❖ Mettre en place des « scellements isolant le stockage » au toit des argilites,

❖ Limiter la différence de charge entre les différents ouvrages de liaison surface-fond, pour limiter les circulations en U entre ces ouvrages via le stockage : vérifier le caractère négligeable des débits de RN dus aux circulations en U possibles devant ceux provenant des argilites préalablement à l'implantation des ouvrages de liaisons surface-fond.

→ Limiter le débit d'eau dans la formation hôte du Callovo-Oxfordien = Limiter les flux d'eau susceptibles d'être drainés dans la formation hôte :

Localisation du stockage dans une zone peu perméable où le gradient de charge hydraulique est inférieur à 0,2 m/m

→ Limiter les flux d'eau dans les ouvrages du stockage

- Limiter les flux d'eau effectivement captés par l'ensemble du stockage (par rapport à ceux susceptibles d'être captés dans les formations sus-jacentes et dans la formation hôte)

❖ Conception de l'architecture et des éléments ouvrages pour préserver les propriétés hydrauliques de la formation hôte des effets thermiques, mécaniques, hydrauliques et chimiques :

- Limiter les sollicitations thermiques : limiter la densité de stockage et réduire le potentiel thermique avant mise en stockage,

- Limiter les sollicitations mécaniques en minimisant les vides résiduels. Prendre des dispositions de conception, notamment : largeurs de piliers entre ouvrages (≥ 5 fois le diamètre excavé pour les alvéoles MAVL, ≥ 4 fois pour les galeries), dispositions de soutènement-revêtement,
 - Limiter l'extension de l'endommagement : maîtriser des techniques de creusement et orienter si nécessaire les alvéoles pour limiter l'endommagement,
 - Limiter la pression due aux gaz produits à un niveau inférieur à la pression d'entrée de gaz dans l'argilite (limiter les surfaces métalliques accessibles à l'eau).
 - ❖ Conception des scellements et de l'architecture de stockage :
 - Mettre en place des scellements de perméabilité équivalente la plus faible possible (performance requise à optimiser le cas échéant au vu des calculs de sûreté), notamment en maîtrisant l'endommagement de la roche,
 - Concevoir une architecture limitant la présence et la formation de circulations d'eau dans les ouvrages,
 - Limiter autant que possible les sections excavées des galeries (et des scellements) pour limiter les flux d'eau.
 - ❖ Construction :
 - Mettre en œuvre des techniques de creusement-soutènement-revêtement visant à limiter l'endommagement (importance et extension spatiale) et à préserver la faible perméabilité de l'argilite,
 - Orienter si nécessaire les scellements pour limiter l'endommagement à un niveau compatible avec la faible perméabilité équivalente acceptée au vu des calculs de sûreté.
 - Limiter les flux d'eau dans les alvéoles HA et CU3 :
Lors de la conception des alvéoles HA :
 - ❖ Concevoir les alvéoles HA borgnes,
 - ❖ Mettre en place un bouchon.
 - Limiter les flux d'eau dans les alvéoles MAVL
Lors de la conception de la zone MAVL et de l'architecture :
 - ❖ Mettre en place des scellements d'alvéoles de faible perméabilité équivalente,
 - ❖ Minimiser les vides dans l'alvéole.
- (option de sûreté jalon 2009)

L'Andra s'est engagée à évaluer, dans le dossier accompagnant la DAC, les quantités d'eau attendues dans le stockage pendant sa période d'exploitation, en prenant en compte les différentes sources potentielles, qu'elles soient associées au milieu géologique, à l'exploitation quotidienne du stockage, ou qu'elles soient générées lors d'incidents (rupture de canalisation, extinction d'incendie...), et spécifier sur cette base les dispositions retenues pour maîtriser ces venues d'eau.

L'Andra devra aussi présenter les mesures de prévention et les dispositions pour remédier au colmatage des drains du revêtement des liaisons jour-fond pendant toute la durée de la phase d'exploitation ; celles-ci devront être définies sur la base du retour d'expérience

acquis notamment au laboratoire souterrain et associées au programme de surveillance des ouvrages de liaison jour-fond comprenant notamment le suivi piézométrique des aquifères drainés. Compte tenu de ces dispositions, les pressions maximales d'eau susceptibles d'être obtenues devront être estimées et le revêtement des liaisons jour-fond devra être dimensionné en conséquence.

D'une manière générale, l'IRSN considère que l'Andra devra présenter, dans le dossier accompagnant la DAC, les dispositifs de maîtrise des eaux qui seront mis en place au niveau du Barrois dans les puits et dans la descenderie. Pour ce qui concerne les dispositifs d'étanchéité, l'Andra devra préciser leur objectif de performance, les dispositions de contrôle de leur efficacité, ainsi que les conséquences d'un éventuel défaut et les dispositions associées pour y remédier. Pour ce qui concerne les dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux drainées, l'Andra devra justifier, au regard des quantités d'eau susceptibles d'être recueillies, le dimensionnement des capacités de rétention et des débits d'évacuation. En outre, l'Andra devra évaluer, sur la base de premières investigations de terrain, la présence éventuelle de poches karstiques à proximité des liaisons jour-fond et présenter sa stratégie vis-à-vis d'éventuels compléments d'investigation et de gestion de ces poches. L'ANDRA s'y est engagée. (Avis IRSN 2010).

b) Eau utilisée pour les travaux au fond

Risque d'inondation interne : fuite, eau pour incendie, débordement d'un bassin de rétention. Limitation par choix de matériaux étanches et résistants, pas de canalisations ou réserves d'eau dans les locaux contenant des colis radioactifs, entretien et surveillance des réseaux, présence de capteurs de niveaux, installation de vannes d'arrêt ... (option de sûreté jalon 2009)

c) Post fermeture

1) Les fonctions de sûreté auxquelles la formation hôte participe sont les suivantes :

S'opposer à la circulation d'eau :

La formation hôte participe à cette fonction par ses caractéristiques intrinsèques de perméabilité. La faiblesse du gradient vertical créé par la différence de charge entre les encaissants y contribue également.

2) Contribution de l'architecture aux fonctions de sûreté après fermeture :

S'opposer à la circulation d'eau :

L'architecture contribue à limiter la circulation d'eau dans les ouvrages et leur zone endommagée associée en limitant les perturbations du régime hydraulique naturel de la formation hôte. Elle y participe en limitant la capacité de drainage totale du stockage, et en évitant des configurations d'ouvrages (puits, descenderies, galeries) créant des moteurs hydrauliques et en limitant l'endommagement des argilites (zone potentielle de circulation de l'eau).

Le choix de la zone de la ZIRA a été associé à sa capacité à s'opposer à la circulation d'eau : de par ses caractéristiques bien connues grâce au laboratoire souterrain et au programme de reconnaissance sur la zone de transposition, les propriétés hydrauliques de la formation

hôte (faible perméabilité, homogénéité, faible gradients verticaux) permettent de s'opposer à la circulation de l'eau. Les acquis de connaissance confirment ces caractéristiques :

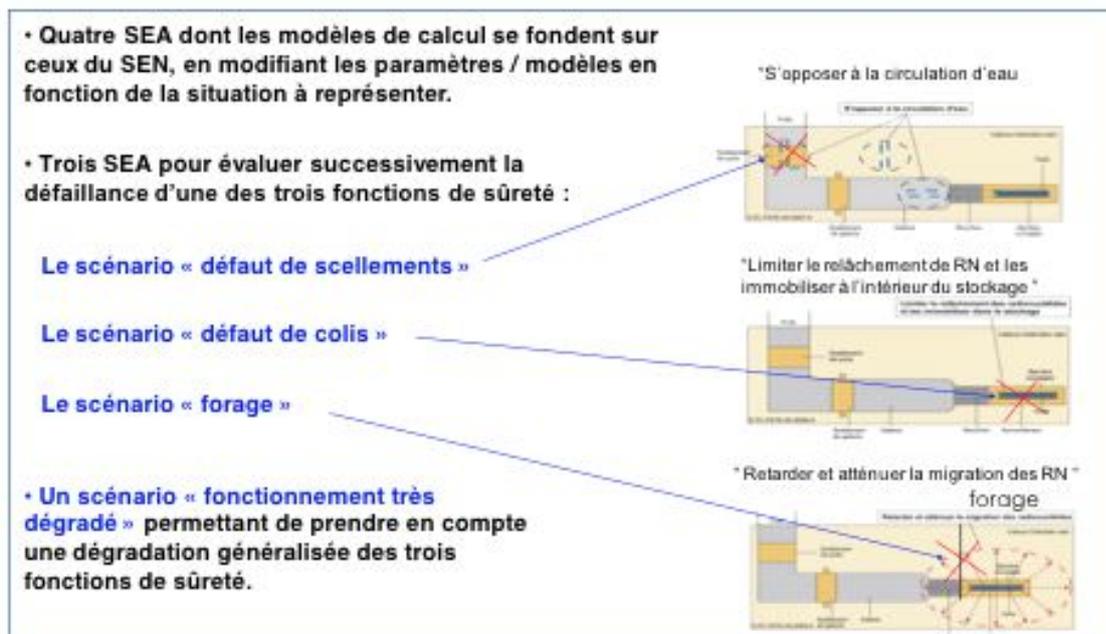
- L'absence de faille sur la zone de transposition. Les profils sismiques 2D n'ont mis en évidence aucune faille sur la zone étudiée, aucun des forages réalisés n'a traversé de faille secondaire (de quelques centaines de mètres d'extension), aucune faille n'a été traversée lors du creusement des galeries du laboratoire souterrain. Un forage dirigé oblique a traversé la zone où la sismique 3D avait détecté des structures subverticales de direction Ouest Nord Ouest–Est Sud Est. Les observations montrent qu'il ne s'agit pas de failles mais d'un faciès qui s'apparente à des récifs de coraux, les mesures réalisées révèlent que cette zone présente une très faible perméabilité.

- La très faible perméabilité de la formation hôte. Les mesures en forage profond et sur échantillons ont révélé une perméabilité de la couche qui varie de $1.5 \cdot 10^{-12}$ à 10^{-14} mètre par seconde (m/s), l'essentiel des mesures étant concentré entre $5 \cdot 10^{-13}$ et $5 \cdot 10^{-14}$ m/s. Il n'est pas observé de variation latérale marquée de la perméabilité, une légère tendance évolutive dans les niveaux supérieurs de la couche ; les acquis permettent de disposer de profils de variation de la perméabilité verticale à l'échelle de la zone de transposition.

- Le faible gradient hydraulique dans la formation. Compte tenu de la position de la ZIRA, la valeur du gradient est de 0,2 m/m à l'actuel. (option de sûreté jalon 2009)

3) L'analyse de performance post fermeture se fait selon différents scénarios :

Le scénario d'évolution normale (SEN) et plusieurs scénarios d'évolution altérée (SEA). Les SEA prennent en compte différentes hypothèses : défaut de colis, défaut de scellement, intrusion humaine ou 'fonctionnement très dégradé' qui permet de tester la robustesse du stockage. En SEA, une arrivée d'eau est alors possible sur les colis. (option de sûreté jalon 2009)



Gestion des incertitudes selon leurs origines :

Comportement mécanique				
Composants concernés	Fonction(s) de sûreté concernée(s)	Incertitudes	Modalités de gestion	
			Options de conception	Scénarios
Tous les ouvrages, (puits, descenderies, galeries, alvéoles)	S'opposer à la circulation d'eau Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Variabilité de la profondeur d'implantation du stockage au stade actuel	Implantation au maximum d'argilosité (proche du milieu de la couche)	En SEN, extension de l'EDZ par modèle conservatif en fonction de la profondeur. prise à 630m pour être enveloppe au jalon 2009, dépendra ensuite de la ZIRA (<600m).
Tous les ouvrages, (puits, descenderies, galeries, alvéoles)	S'opposer à la circulation d'eau Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Extension de la zone endommagée à court terme après creusement	Possibilité de limitation par orientation des alvéoles et des galeries destinées à recevoir des scellements selon la direction de contrainte majeur (sigmaH)	En SEN, extension évaluée par modèle conservatif en fonction de la profondeur. prise à 630m pour être enveloppe au jalon 2009, dépendra ensuite de la ZIRA (<600m).
Tous les ouvrages, (puits, descenderies, galeries, alvéoles)	S'opposer à la circulation d'eau Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Perméabilité initiale de la zone endommagée à court terme après creusement	Possibilité de limitation par orientation des alvéoles et des galeries destinées à recevoir des scellements selon la direction de contrainte majeur (sigmaH)	La fissuration hydrique sous l'effet de la désaturation des zones ventilées est un phénomène réversible : sensibilité au SEN sur la perméabilité de la zone endommagée vers des valeurs dégradées. Etudes complémentaires en cours.
Alvéole de déchets HA	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Modèle de comportement différé de la zone endommagée. Effets du couplage hydro-mécanique sur l'évolution de l'endommagement des argilites	Pose d'un chemisage pour la tenue mécanique de l'alvéole. Minimisation des vides.	En SEN, l'endommagement initial est représenté constant sur la période d'analyse (sans cicatrisation). Etudes complémentaires en cours.
Bouchon d'argile d'alvéole de déchets HA	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Modèle de comportement différé de la zone endommagée Effets du couplage hydro-mécanique sur l'évolution de l'endommagement des argilites	Maintien du chemisage en tête d'alvéole	Etudes complémentaires en cours. Couvert par SEA défaut de scellement.
Bouchon d'argile d'alvéole de déchets HA	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Effets des produits de corrosion issus du chemisage en tête d'alvéole.		Etudes complémentaires en cours. Couvert par SEA défaut de scellement.

Comportement mécanique				
Composants concernés	Fonction(s) de sûreté concernée(s)	Incertitudes	Modalités de gestion	
			Options de conception	Scénarios
Alvéole de déchets MAVL	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Modèle de comportement différé de la zone endommagée. Effets du couplage hydro-mécanique sur l'évolution de l'endommagement des argilites	Possibilité de limitation par orientation des alvéoles favorable vis-à-vis des contraintes naturelles (selon σ_H), si nécessaire. Pose d'un revêtement et soutènement pour la tenue mécanique de l'alvéole. Minimisation des vides.	En SEN, l'endommagement initial est représenté constant sur la période d'analyse, correspondant à la décharge initiale. Etudes complémentaires sur l'évolution de la zone endommagée d'alvéoles de déchets MAVL.
Scellements de modules/zones de stockage, galeries de liaison de liaison principales	S'opposer à la circulation d'eau Retarder et atténuer la migration des radionucléides Préserver les caractéristiques de la formation hôte	Modèle de comportement différé de la zone endommagée Effets du couplage hydro-mécanique sur l'évolution de l'endommagement des argilites	Par conception : orientation si nécessaire des galeries selon σ_H , pas de boulons en paroi. Etude de dispositifs d'ancrage des scellements destinés à interrompre une zone trop perméable.	En SEN, l'endommagement initial est représenté constant sur la période d'analyse, correspondant à la décharge initiale. Etudes complémentaires en cours.
Massif d'appui des scellements et bouchon	Via le scellement : s'opposer à la circulation d'eau	Effet pluriséculaire de l'attaque sulfatique Modèle de dégradation des bétons	Par conception, formulation adaptée du béton.	En SEN, pas de performance vis-à-vis du transfert. Etudes complémentaires en cours.
Noyaux argileux de scellements et bouchons en argile d'alvéoles HA	S'opposer à la circulation d'eau Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Amplitude de l'effet de re-compression de la bentonite sur l'argilite Capacité de gonflement de la bentonite sous l'effet des eaux calciques	Par conception, adaptation de la densité de compaction de la bentonite pour obtenir la pression de gonflement souhaitée.	Un gonflement insuffisant pourrait limiter l'efficacité du bouchon, et un gonflement trop important pourrait créer un sur-endommagement : traités en SEA défaut de scellement. Etudes complémentaires en cours.
Alvéole de déchets HA, bouchon d'argile d'alvéole de déchets HA	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage.	Effet du couplage thermo-mécanique sur l'évolution de l'endommagement des argilites Effets du couplage thermo-mécanique dans la bentonite	Température de l'alvéole et de l'argilite est limitée à moins de 100°C par densité de stockage, (espacement entre alvéoles, nombre de colis par alvéole, intercalaires).	En SEN, les effets sont considérés comme réversibles du fait des températures, limitées par conception. Une sensibilité vers des valeurs de perméabilité conservatives de la zone endommagée. Etudes complémentaires en cours.
Bouchon d'argile d'alvéole de déchets HA, scellement de zone, de galerie de liaison principale	S'opposer à la circulation d'eau Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Effet mécanique des gaz dans les argilites Effet mécanique des gaz dans l'argile des bouchons et scellements.		Effets réversibles, couvert par SEA défaut de scellement. Etudes complémentaires en cours.

Comportement mécanique				
Composants concernés	Fonction(s) de sûreté concernée(s)	Incertitudes	Modalités de gestion	
			Options de conception	Scénarios
Revêtements et remblais de galeries	Via le scellement : s'opposer à la circulation d'eau.	Insuffisance des spécifications du remblai en argilites au regard des performances mécaniques attendues à long terme Effet pluriséculaire de l'attaque sulfatique sur les bétons Mise en place non maîtrisée du remblai conduisant à un soutien insuffisant de la roche	Pose de soutènements en paroi d'ouvrage qui limitent l'extension de l'EDZ (pendant exploitation) Formulation spécifique du remblai d'appui pour obtenir un coefficient de frottement suffisant.	Le scellement repose sur un massif d'appui et un remblai en béton. S'il devait être mal conçu, alors le scénario défaut de scellement couvrirait ce cas de figure.
Surconteneur HA	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Contraintes mécaniques et thermomécaniques supportées par les surconteneurs en fonction du temps	Dimensionnement de l'épaisseur du conteneur ou surconteneur est définie en fonction de la vitesse de corrosion et de la durée de vie nécessaire. Chemisage assurant la tenue mécanique de l'alvéole	En SEN, modèle de corrosion conservatif.
Scellement de puits	S'opposer à la circulation d'eau Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Effets du couplage hydro-mécanique sur l'évolution de l'endommagement des argilites. Modèle de comportement différé de la zone endommagée Effet mécanique des gaz dans les argilites et dans la bentonite.	Implantation du scellement de puits dans la zone géomécanique A, plus favorable. De plus, une éventuelle zone fracturée de faible extension pourrait être retirée avant mise en place du scellement de puits.	En SEN, zone fracturée non représentée, l'endommagement initial de la zone microfissurée est représenté constant sur la période d'analyse, correspondant à la décharge initiale Effets des gaz réversibles. A titre conventionnel : irréversibilité de la microfissuration éventuellement due aux gaz dans les argilites. Elle pourrait conduire à un sur-endommagement autour du scellement, traité en SEA défaut de scellement

Effets thermiques				
Composants concernés	Fonctions de sûreté concernées	Incertitudes	Modalités de gestion	
			Options de conception	Scénarios
Alvéole de déchets HA, bouchon d'argile d'algéole de déchets HA Scellements de module (dans les galeries de zone de déchets HA) et scellement de zone HA, Callovo-Oxfordien hors zone endommagée	S'opposer à la circulation d'eau Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage.	Evolution des équilibres d'adsorption avec la température, dans les argiles et argilites Evolution du coefficient de diffusion et de la porosité des argilites et argiles avec la température	Option d'un surconteneur étanche pour empêcher les transferts en ambiance thermique. Température limitée à 90°C (densité de stockage, espacement des algéoles et des colis, intercalaires)	Dans le SEN, pour les cas de conteneurs défaillants, il est proposé d'appliquer un facteur correctif pour les éléments pour lesquels le Kd diminue (Be, Ca et Cs). Pris en compte de manière préliminaire au travers d'un calcul de sensibilité sur le coefficient de diffusion Acquis de connaissance en cours au laboratoire souterrain du (CMHM)
Bouchon en argile, Noyau argileux de scellement	S'opposer à la circulation d'eau Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Effets du couplage thermo-mécanique sur la bentonite	Température limitée à 90°C (densité de stockage) Option d'un surconteneur étanche pour empêcher les transferts en ambiance thermique.	En SEN les effets sont considérés comme réversibles du fait des températures limitées par conception.
Bouchon d'algéole de déchets HA Callovo-Oxfordien en paroi d'algéole de déchets HA	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Effet du couplage thermo-mécanique sur l'évolution de l'endommagement des argilites	Température limitée à 90° (densité de stockage) Option d'un surconteneur étanche pour empêcher les transferts en ambiance thermique. Maintien du chemisage en tête d'algéole	En SEN, représentation de la zone endommagée, l'extension de l'EDZ reste constante sur la période d'analyse. Couverte par les études de sensibilité vers des valeurs de perméabilité dégradées (in fine serait couverte par le SEA défaut de scellement).

Interactions et perturbations chimiques				
Composants concernés	Fonctions de sûreté concernées	Libellé de l'incertitude	Modalités de gestion	
			Options de conception	Scénarios
Bouchon d'argile d'alvéole de déchets HA	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	<p>Extrapolation des effets de la perturbation fer-bentonite des hautes températures / temps courts vers les basses températures / temps longs</p> <p>Extension de la perturbation alcaline dans les argilites</p> <p>Extension de la perturbation alcaline dans la bentonite</p> <p>Effet cumulé des perturbations chimiques</p>	Mise en place d'un bouchon argileux dimensionné pour tamponner les perturbations alcaline et fer/argile	<p>En SEN, épaisseur du bouchon argileux fortement reminéralisée non prise en compte pour la rétention chimique.</p> <p>Prises en compte en SEA défaut de scellement (perméabilité dégradée du bouchon argileux).</p>
Scellements d'alvéoles de déchets MAVL, scellements de modules/zones de stockage,	<p>S'opposer à la circulation d'eau</p> <p>Retarder et atténuer la migration des radionucléides</p>	<p>Extension de la perturbation alcaline dans les argilites</p> <p>Extension de la perturbation alcaline dans la bentonite</p> <p>Capacité de gonflement de la bentonite sous l'effet d'échanges d'ions avec le calcium.</p> <p>Incertitude sur la composition des eaux interstitielles</p>	<p>Dépose du revêtement en béton à l'emplacement des coupures hydrauliques</p> <p>Longueur du noyau argileux décimétrique prend en compte une zone perturbée</p>	<p>En SEN, épaisseur du noyau argileux fortement reminéralisée au contact du massif d'appui non prise en compte pour la rétention chimique.</p> <p>Prises en compte dans le SEA défaut de scellement.</p>
Scellement de puits	<p>S'opposer à la circulation d'eau</p> <p>Retarder et atténuer la migration des radionucléides</p>	<p>Extension de la perturbation alcaline dans les argilites</p> <p>Extension de la perturbation alcaline dans le noyau argileux du scellement</p>	Dépose du revêtement en béton sur toute la hauteur du noyau argileux	En SEN, épaisseur du noyau argileux fortement reminéralisée au contact du massif d'appui non prise en compte pour la rétention chimique.

Phénomènes liés au transport				
Composants concernés	Fonction(s) de sûreté concernée(s)	Incertitudes	Modalités de gestion	
			Options de conception	Scénarios
Alvéoles de déchets HA, bouchon d'argile d'alvéole de déchets HA	<p> limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage</p> <p> Préserver les caractéristiques de la formation hôte</p>	Incertitude sur le rôle chimique des produits de corrosion vis-à-vis de la silice	Mise en place d'un bouchon argileux à faible porosité	<p> Cette incertitude est prise en compte en SEN considérant une capacité de sorption de la silice par les produits de corrosion et en négligeant tout apport extérieur de silice</p> <p> Etudes complémentaires en cours</p>
Alvéoles de déchets MAVL	<p> limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage</p> <p> Préserver les caractéristiques de la formation hôte</p>	Incertitude sur les complexants organiques relâchés par certains colis primaires MAVL.	<p> Les complexants organiques sont inhibés par l'environnement alcalin : le colis de stockage, le revêtement et soutènement assurent un milieu alcalin</p> <p> Répartition des colis dans des alvéoles (modules) dédiées, isolés des autres par une garde d'argilite.</p> <p> Distance de garde entre modules de 60m pour leur indépendance phénoménologique (notamment vis-à-vis des complexants), prise égale à la garde verticale d'argilites.</p>	<p> En cas de défaut de scellement, représenté en première approche par une sensibilité sur le Csat (infini) dans la zone fracturée</p> <p> Etudes complémentaires en cours.</p>
Alvéoles de déchets HA, bouchon d'argile d'alvéole de déchets HA Alvéoles de déchets MAVL	<p> Retarder et atténuer la migration des radionucléides</p> <p> Préserver les caractéristiques de la formation hôte</p>	<p> Incertitude sur le rôle chimique des produits de corrosion vis-à-vis du transfert des radionucléides</p> <p> Incertitude sur le rôle chimique des colloïdes vis-à-vis du transfert des radionucléides</p>	Par conception en interposant un milieu argileux autour des alvéoles (argilites et bouchon en argile ou argilites et noyau argileux de scellements)	<p> Prise en compte en défaut de scellement, représenté en première approche par une sensibilité sur le Csat (infini) dans la zone fracturée.</p> <p> Etudes complémentaires en cours</p>

Conditions et durée d'exploitation				
Composants concernés	Fonctions de sûreté concernées	Incertitudes résiduelles	Modalités de gestion	
			Options de conception	Scénarios
Callovo-Oxfordien Tous les composants ouvrés	S'opposer à la circulation d'eau Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Incertitude sur la durée et les conditions de la phase d'exploitation Incertitudes sur la durée de la phase de resaturation.	Architecture d'ensemble et implantation des ouvrages avec scellements multiples qui maîtrisent la circulation des eaux	En SEN, le stockage est considéré saturé dès le début de la phase après fermeture Etudes complémentaires en cours Observations et surveillance pendant la phase d'exploitation
Surconteneur HA Chemisage, Bouchon métallique	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	Incertitude sur la durée et les conditions de la phase d'exploitation Incertitude sur les conditions d'environnement dans l'alvéole (conditions redox)	Influence sur la vitesse de corrosion limitée par conception par dimensionnement du surconteneur, pose d'un capot étanche à l'entrée de l'alvéole, puis d'un bouchon argileux pour maintien des conditions favorables dans l'alvéole Etude de la possibilité d'un chemisage étanche	Un modèle de corrosion généralisée conservatif est retenu en SEN (c'est à dire un transitoire redox de courte durée) avec en référence une vitesse de corrosion phénoménologique et avec une sensibilité à la vitesse de corrosion adoptant une valeur conservative. Etudes complémentaires en cours Observations et surveillance pendant la phase d'exploitation
Soutènement, Revêtement, et remblai de galeries	Via scellement : S'opposer à la circulation d'eau Retarder et atténuer la migration des radionucléides	Incertitude sur le comportement différé de la roche Incertitude sur la géochimie des eaux Incertitude sur modèle de dégradation des bétons Incertitude sur l'effet pluriséculaire de l'attaque sulfate	Dimensionnement des soutènements pour une durée séculaire	Endommagement de la formation hôte couvert par la sensibilité au SEN vers des valeurs dégradées de la zone endommagée Des essais avec démonstrateur de mise en place du remblai. Observations et surveillance pendant la phase d'exploitation
Massifs d'appui de scellements	Via scellement : S'opposer à la circulation d'eau Retarder et atténuer la migration des radionucléides	incertitude sur le comportement différé de la roche Incertitude sur la géochimie des eaux Incertitude sur modèle de dégradation des bétons Incertitude sur l'effet pluriséculaire de l'attaque sulfate	Dimensionnement des massifs d'appui pour tenir à la pression de gonflement du noyau argileux	Le SEA défaut de scellements, couvre implicitement tout phénomène affectant les massifs en béton. Des essais en laboratoire souterrain Observations et surveillance pendant la phase d'exploitation
Alvéole de déchets MAVL	Limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage	incertitude sur le comportement différé de la roche Incertitude sur la géochimie des eaux Incertitude sur modèle de dégradation des bétons Incertitude sur l'effet pluriséculaire de l'attaque sulfate	Dimensionnement des soutènements, revêtement pour une durée a minima séculaire (période d'exploitation et réversibilité)	Des études complémentaires en cours Observations et surveillance pendant la phase d'exploitation