

DOCUMENT TECHNIQUE

PNGMDR 2016-2018

ANALYSE MULTICRITÈRE DES OPTIONS DE CONCEPTION D'ENTREPOSAGES COMPLÉMENTAIRES AU STOCKAGE

Identification
C.RP.ASFP.18.0007

septembre 2018

Page : 1 / 25

SOMMAIRE

1. Objet	4
2. Historique des études sur l'entreposage	4
2.1 <i>Les recherches sur l'entreposage de longue durée menées par le CEA dans le cadre de la loi de 1991</i>	4
2.2 <i>La nouvelle orientation donnée par la loi de 2006</i>	5
3. Les études 2007-2012 sur des options techniques de conception d'entreposage pour les colis HA et MA-VL	5
3.1 <i>Les études exploratoires de 2007 à 2009</i>	5
3.2 <i>Les études approfondies de 2010 à 2012</i>	6
4. Les principes de l'analyse multicritère	7
4.1 <i>Les critères retenus pour l'analyse multicritère des concepts étudiés</i>	7
4.2 <i>Les concepts soumis à l'analyse multicritère</i>	8
4.2.1 Les concepts d'entreposage de colis de déchets HA	8
4.2.2 Les concepts d'entreposage de colis de déchets MA-VL	8
5. Les résultats de l'analyse multicritère	9

1. Objet

L'Andra a mené entre 2006 et 2015 un programme d'études et de recherches sur l'entreposage des déchets HA et MA-VL en complémentarité avec le stockage géologique. Ce programme s'est traduit par la fourniture en 2009 d'un inventaire des capacités d'entreposage existantes, d'un état d'avancement d'études de concepts d'entreposage en surface et à faible profondeur et de propositions d'options à étudier après 2009, en 2012 d'un bilan des études et recherches et enfin en 2015 de recommandations pour la conception d'installations d'entreposage s'inscrivant dans la complémentarité avec le stockage. Ce programme a permis d'identifier diverses innovations à caractère générique susceptibles d'être intégrées à de nouveaux entrepôts à réaliser en complément du projet Cigéo. Il n'avait en revanche pas vocation à se substituer aux études de conception de ces entrepôts. Ces dernières relèvent de leurs exploitants, qui peuvent s'appuyer sur une longue expérience en la matière.

Le présent rapport constitue la réponse de l'Andra à l'article 52 de l'arrêté PNGMDR du 23 février 2017 qui dispose que « *L'ANDRA communique au ministre chargé de l'énergie avant le 31 décembre 2017 les éléments techniques sur la base desquels elle a écarté l'option de conception d'installations d'entreposage à faible profondeur. L'ASN est saisie pour avis sur ces éléments.* »

Après avoir rappelé l'historique des études faites sur l'entreposage des déchets de haute activité et à vie longue depuis la loi du 30 décembre 1991, ce rapport :

- décrit synthétiquement les travaux entrepris par l'Andra, en réponse aux prescriptions du PNGMDR 2007-2009,
- détaille l'analyse multicritère qui a conduit l'Andra à retenir en 2009 des concepts en surface pour approfondir l'étude d'innovations dans le cadre de la dernière phase de son programme de recherche.

2. Historique des études sur l'entreposage

2.1 Les recherches sur l'entreposage de longue durée menées par le CEA dans le cadre de la loi de 1991

La loi du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue définissait trois axes de recherche complémentaires :

- la recherche de solutions permettant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans ces déchets,
- l'étude des possibilités de stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains,
- l'étude de procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface de ces déchets.

Ce dernier axe de recherche était confié au CEA qui a ainsi étudié l'entreposage de longue durée de la totalité des déchets HA et MA-VL. Cet axe de recherche couvrait aussi les combustibles usés dans une hypothèse de non retraitement ou de retraitement différé. L'objectif initial de l'étude était d'évaluer la faisabilité d'une durée de fonctionnement des entreposages au-delà de la centaine d'années (jusqu'à 300 ans) et de simplifier leur surveillance et leur maintenance, afin de réduire la charge sur le long terme de la gestion de ces déchets. Conformément à la demande, le CEA a étudié des concepts d'installations d'entreposage en surface et en sub-surface, indépendamment du choix d'un site, et approfondi six concepts pour les déchets MA-VL, les déchets HA vitrifiés et les combustibles usés. Des

Par définition, l'entreposage de déchets radioactifs est « *l'opération consistant à placer ces déchets à titre temporaire dans une installation spécialement aménagée en surface ou en faible profondeur à cet effet, dans l'attente de les récupérer* » tandis que le stockage est « *l'opération consistant à placer ces déchets dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive* ». L'entreposage est donc toujours temporaire et nécessite une reprise des déchets.

dossiers de définition d'installations d'entreposage de longue durée ont ainsi été élaborés, montrant qu'au plan technique il était possible de construire de telles installations.

L'ensemble de ces études a fait l'objet :

- d'une évaluation de la Commission nationale d'évaluation (CNE), qui a conclu en 2006 que la possibilité de prolonger, au-delà d'un maximum de 100 ans, la période d'exploitation d'un entreposage n'était pas démontrée. Dans l'état actuel des connaissances scientifiques et techniques, entreposer des déchets sur plusieurs siècles imposerait donc un renouvellement périodique des installations,
- d'un examen de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) qui a considéré, dans son avis de février 2006 sur les recherches menées dans le cadre de la loi de 1991, « *que l'entreposage de longue durée ne peut pas constituer une solution définitive pour la gestion des déchets radioactifs de haute activité à vie longue* » car il « *suppose le maintien d'un contrôle de la part de la société et leur reprise par les générations futures, ce qui semble difficile à garantir sur des périodes de plusieurs centaines d'années* ».

2.2 La nouvelle orientation donnée par la loi de 2006

Fondée sur les acquis des quinze années de recherche menées dans le cadre de la loi de 1991, sur leur évaluation par la Commission nationale d'évaluation et sur l'avis de l'ASN sur ces recherches précitées, la loi de 2006 a :

- retenu comme l'option de référence pour la gestion à long terme des déchets HA et MA-VL le stockage réversible en formation géologique profonde afin de minimiser la charge aux générations futures. En effet, même si les travaux menés par le CEA dans le cadre de la loi de 1991 ont dégagé des voies pour augmenter la durabilité des entrepôts industriels de dernière génération, le législateur a considéré que l'entreposage de longue durée, parce qu'il impose des contraintes de surveillance et de maintenance aux générations futures, n'apporte pas les garanties d'une solution robuste de confinement des déchets ultimes sans besoin d'une intervention humaine,
- en conséquence, réorienté les études sur l'entreposage vers des études appliquées visant à accompagner l'extension d'installations existantes ou la création de nouvelles installations, en complémentarité avec le stockage.

En parallèle, la loi de 2006 a transféré le pilotage des recherches et études sur l'entreposage du CEA à l'Andra, chargeant cette dernière de réaliser ou faire réaliser des recherches et études sur l'entreposage en vue, au plus tard en 2015, de créer de nouvelles installations d'entreposage ou de modifier les installations existantes, pour répondre aux besoins, notamment en termes de capacité et de durée.

Depuis 2006, ce sont les éditions successives du PNGMDR et ses décrets d'application qui prescrivent les travaux à conduire par l'Andra en matière d'entreposage.

3. Les études 2007-2012 sur des options techniques de conception d'entreposage pour les colis HA et MA-VL

3.1 La période 2007 à 2009

Le PNGMDR 2007-2009 prescrivait à l'Andra de proposer avant fin 2009 des études sur les évolutions possibles en matière d'entreposage. Pour répondre à cette demande, l'Andra a mené un premier travail de 2007 à 2009, articulé autour d'une part d'une analyse des besoins en nouvelles capacités d'entreposage et d'autre part de la recherche d'options techniques répondant aux objectifs de complémentarité avec le stockage, notamment pour conforter la durabilité et la robustesse d'installations d'entreposage adaptées pour fonctionner environ un siècle.

En matière d'options techniques d'entreposage, des études ont été conduites pour évaluer les possibilités techniques en matière de complémentarité entreposage-stockage, proposer des évolutions dans la conception des entrepôts et apporter des éléments de comparaison. Ce travail, qui a revêtu un caractère exploratoire, n'a pas cherché à figer des solutions techniques.

Au plan technologique, au-delà de l'examen des solutions déjà mises en œuvre dans les installations en exploitation, l'Andra a fait réaliser des études d'ingénierie portant sur la définition de concepts d'installations d'entreposages complémentaires au stockage, autant que possible plus robustes et plus flexibles que les installations existantes, en se basant sur la recherche d'améliorations et d'innovations dans les domaines de la durée d'exploitation (séculaire), de la facilité de manutention des colis et de surveillance, de la capacité de s'adapter à différents types de colis. Des concepts à faible profondeur ont été étudiés parallèlement à des concepts plus classiques en surface : l'objectif était d'évaluer l'intérêt éventuel que ce type de concept pourrait offrir au plan de la robustesse ainsi que ses limites techniques.

Ces études se sont déroulées en deux phases :

- la première phase a consisté à identifier de manière aussi large que possible des solutions techniques susceptibles de répondre aux besoins, et à les comparer entre elles au regard des performances recherchées. Puis quelques options de conception contrastées ont été sélectionnées au terme de cette phase. Le choix de ces options s'est appuyé sur des critères d'aptitude à la robustesse et à la durabilité, d'adaptabilité et d'évolutivité, ainsi que sur leur caractère innovant par rapport aux solutions opérationnelles. Huit concepts ont ainsi été retenus : trois concepts HA en surface, deux concepts HA à faible profondeur, deux concepts MAVL en surface et un concept MAVL à faible profondeur ;
- la seconde phase a consisté à réaliser des études de faisabilité au niveau d'esquisses de ces huit concepts, complétées d'une analyse multicritère afin de dégager des orientations pour la suite des études et recherches. Cette analyse multicritère, détaillée au paragraphe 4, a conduit à sélectionner quatre concepts, tous en surface, trois pour les déchets HA, un pour les déchets MA-VL.

Ces études exploratoires ont été décrites dans le rapport remis en 2009 par l'Andra qui se concluait par un ensemble de propositions d'études autour des quatre concepts sélectionnés fondées sur une analyse de la complémentarité de l'entreposage et du stockage.

Ces propositions ont alors fait l'objet d'évaluations et d'échanges avec différents acteurs, notamment les producteurs, qui ont ensuite permis à l'Andra de poursuivre les études et recherches sur des orientations partagées.

3.2 La période 2010 à 2012

Partant des propositions formulées en 2009, l'Andra a poursuivi entre 2010 et 2012 l'étude de scénarios de gestion des déchets associant l'entreposage et le stockage dans une logique de complémentarité, d'autre part à approfondir les études et recherches sur la base des quatre concepts novateurs d'entreposage retenus à l'issue de la période 2007-2009. Les objectifs définis pour ces recherches visaient notamment à augmenter la puissance thermique admissible des colis de déchets de haute activité, à optimiser les processus de manutention et à améliorer l'articulation avec le transport. Des moyens de surveillance intégrés aux installations pour contrôler leur vieillissement et celui des colis entreposés ont été étudiés ainsi que des systèmes permettant de mesurer la puissance thermique des colis et leurs dégagements gazeux. Parallèlement, les recherches sur le comportement des matériaux en entreposage pendant une durée séculaire se sont poursuivies.

Conformément à la demande du PNGMDR 2010-2012, l'Andra a remis en 2012 le bilan des études et recherches menées sur l'entreposage dans le cadre de la loi de 2006.

« Inventaire des capacités d'entreposage existantes, état d'avancement des études de concepts d'entreposage, propositions d'options à étudier après 2009 »

« Bilan des études et recherches sur l'entreposage - Déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue » disponible [ici](#) sur le site de l'Andra

4. Les principes de l'analyse multicritère

4.1 Les critères retenus pour l'analyse multicritère des concepts étudiés

Afin de cibler² les études à mener de 2010 à 2012 sur les évolutions possibles en matière d'entreposage des déchets de haute et de moyenne activité à vie longue, l'Andra a mené une analyse multicritère des huit concepts d'entreposage, cinq pour les déchets HA et trois pour les déchets MA-VL, qui ont fait l'objet d'études d'esquisses. Ces concepts devaient satisfaire à des exigences résultant d'une analyse de la complémentarité entre l'entreposage et le stockage réversible : durée de vie et robustesse des installations augmentées (une durée d'exploitation jusqu'à une centaine d'années a été considérée), capacité à accueillir une plus grande diversité de colis de déchets, y compris sous la forme de colis de stockage (recevoir simultanément ou successivement, moyennant des opérations simples d'adaptation de l'installation, des colis de caractéristiques différentes : puissance thermique, dimensions, masse, débit de dose au contact, géométrie des organes de préhension), renforcement de la surveillance des installations et des colis de déchets entreposés (impliquant notamment une facilité de maintenance pour permettre une observation des colis tout au long de la période d'exploitation) tout en conservant un niveau de sûreté au moins équivalent à celui des installations existantes.

Cinq rubriques de critères ont ainsi été identifiées pour évaluer les performances de chacun des concepts étudiés au regard des exigences spécifiées :

- robustesse des systèmes, structures et composants assurant les fonctions de sûreté suivantes : radioprotection, prévention des risques internes, défense contre les agressions externes ;
- accessibilité aux colis pour les examiner en place ou les prélever dans le cadre de la surveillance ;
- polyvalence vis-à-vis des caractéristiques dimensionnelles, thermiques ou radioactives des colis ;
- aptitude à la durabilité : régulation des conditions atmosphériques, facilité de surveillance et de maintenance de l'installation ;
- modularité : adaptabilité des options aux besoins en capacité, possibilité d'une création par tranches successives.

Dans chacune de ces rubriques, des critères élémentaires ont été définis, sur la base du cahier des charges des études d'esquisse. Ces critères sont applicables aux concepts d'entreposage étudiés quel que soit leur type : entreposage de colis de déchets HA ou MA-VL, primaires ou en conteneur de stockage, pour une attente de quelques semaines ou de quelques décennies. Ils découlent directement des performances attendues de ces concepts et s'attachent aux potentialités globales de chaque concept. En effet, la performance d'une architecture d'entreposage dépend non seulement des principes techniques qu'elle adopte, mais aussi du dimensionnement de ses composants, qui n'est pas détaillé au niveau d'une étude de faisabilité. Par exemple, la prolongation possible de la durée d'exploitation dépendra de l'épaisseur d'enrobage des armatures du béton armé et de la formulation de ce béton, qui déterminent en grande partie la durabilité de la structure. Dans certains cas, la performance d'une architecture peut aussi dépendre de l'adjonction ou non de composants secondaires : par exemple la présence d'un filtre électrostatique en entrée d'une ventilation permet de piéger les poussières et les polluants, contribuant ainsi à protéger la structure de l'entreposage et les colis. Cependant la mise en place d'un tel dispositif dépend peu de l'option de base de l'architecture.

Les critères retenus pour évaluer les performances des différents concepts ainsi que les niveaux de performance qui leur sont associés sont détaillés à l'annexe 1.

La démarche qui a conduit au choix de ces huit concepts est détaillée dans le bilan des études et recherches remis en 2012

4.2 Les concepts soumis à l'analyse multicritère

4.2.1 Les concepts d'entreposage de colis de déchets HA

Les cinq concepts d'entreposage de colis de déchets HA qui ont donné lieu à des études d'esquisse sont les suivants :

Concept C1 : entreposage en surface, développé à partir du concept d'entreposage de déchets vitrifiés de La Hague E-EV-SE. Les colis sont regroupés dans des casiers qui peuvent contenir ou 6 colis primaires ou trois colis de stockage. Comme dans E-EV-SE, les casiers sont empilés verticalement dans des puits en acier inoxydable, balayés par une ventilation nucléaire à faible débit pour contrôler l'humidité de l'air et l'accumulation éventuelle de gaz de radiolyse. Le refroidissement est assuré par une ventilation naturelle. L'air circule par thermo-siphonage dans une gaine enveloppant les puits. La manutention est assurée par pont transbordeur et hotte.

Concept C2 : entreposage en surface, développé pour des colis HA dont la puissance thermique a décru jusqu'à être inférieure à 500W, dérivé du concept de l'entreposage des coques compactées, ECC, de La Hague. Les colis primaires ou de stockage sont posés verticalement sur les dalles d'un bâtiment multi étagé. La ventilation est mécanique et horizontale. Elle est dotée de filtres assurant un confinement et peut être secourue par une ventilation naturelle (les filtres étant court-circuités).

Concept C3 : entreposage en surface, développé à partir du concept NUHOMS® d'Orano, largement utilisé aux USA. Les colis HA primaires ou de stockage sont regroupés dans des canisters d'entreposage fermés assurant le confinement et la protection des colis. Ils sont posés horizontalement dans des casemates en béton qui sont refroidies par une ventilation naturelle.

Concept H5 : entreposage à faible profondeur en silo cylindrique réalisé par paroi moulées et excavation depuis la surface. Les colis primaires ou de stockage sont empilés verticalement dans les puits ouverts. Le refroidissement est assuré par de l'air ventilé mécaniquement, circulant au contact des colis dans les puits et refroidi par un circuit contenant un fluide réfrigérant qui évacue la chaleur vers un échangeur placé en surface. Les colis sont descendus au niveau d'entreposage par chariot et hotte dans une descendrière. Ils sont repris par un pont polaire muni d'une hotte qui les amène au droit des puits dans lesquels ils sont descendus.

Concept H15 : entreposage à faible profondeur en galerie réalisée en souterrain par machine à attaque ponctuelle. Les colis primaires ou de stockage sont posés verticalement sur des soles placées sur les planchers des galeries. Le refroidissement est assuré par une ventilation mécanique horizontale. Les colis sont descendus au niveau d'entreposage par un puits de petit diamètre ajusté à celui des colis puis translattés dans les galeries par chariot suspendu au toit des galeries.

4.2.2 Les concepts d'entreposage de colis de déchets MA-VL

Concept P4 : entreposage en surface développé à partir de techniques couramment utilisées dans les grands entrepôts logistiques de l'industrie non nucléaire. L'entreposage de colis primaires regroupés en casiers ou de colis de stockage d'une masse inférieure à 2 000 kg est réalisé dans des rayonnages courts, disposés sur plusieurs étages dans des casemates en béton assurant la radioprotection. La manutention est assurée par chariot automoteur relayé par un transstockeur, l'ensemble étant télé opéré.

Concept S2 : entreposage en surface de colis primaires regroupés en casiers ou de colis de stockage par pré-empilement vertical et placement en longue file sur longrines amovibles pour un ajustement à différentes dimensions des casiers et des colis de stockage. La manutention est assurée par navette mère automotrice, dotée d'une navette fille de faible hauteur guidée par rails entre les longrines. La dépose des colis est assurée par un vérin plat monté sur la navette.

Concept M1 : entreposage à faible profondeur en galeries souterraines de colis primaires regroupés en casiers ou de colis de stockage. Les colis sont amenés au niveau d'entreposage par descendrière à l'aide un chariot avec hotte de radioprotection. Les colis sont ensuite repris par un pont roulant et empilés sur plusieurs niveaux grâce à un élévateur sur dalle.

Ces concepts sont décrits de façon détaillée dans le rapport remis en 2012 par l'Andra
Une machine à attaque ponctuelle n'attaque qu'une partie du front de taille contrairement à un tunnelier.

5. Les résultats de l'analyse multicritère

Sur la base de l'analyse détaillée menée selon les principes décrits ci-dessus et présentée en annexe 2, les cinq concepts d'entreposage de colis de déchets HA et les trois concepts d'entreposage de colis de déchets MA-VL étudiés ont fait l'objet d'un classement relatif dans chacune des rubriques de critères définies.

Les résultats de ce classement sont donnés dans le Tableau 1 pour les concepts d'entreposage de colis HA et dans le Tableau 2 pour les concepts d'entreposage de colis MA-VL.

	Robustesse des fonctions de sûreté	Accessibilité des colis	Polyvalence	Aptitude à la durabilité	Modularité
C1 - Architecture en puits verticaux avec regroupement des colis	+++	++	++++	+++	+++
C2 - Bâtiment multi étagé	++	+++	++	+++	++
C3 - Casemates modulaires en béton sur radier (®NUHOMS)	+++	+	+++	+++	++++
H5 - Entrepôt en puits verticaux construit à ciel ouvert, colis unitaires	+++	+	++	+++	++
H15 - Entrepôt en galeries souterraines	+++	+++	++	++	++

Tableau 1 : Synthèse de l'analyse multicritère des concepts d'entreposage de colis de déchets HA

En ce qui concerne les concepts étudiés pour l'entreposage de colis de déchets HA, l'analyse de leurs performances, basée sur ces évaluations globales, a permis d'identifier des options de conception innovantes augmentant la polyvalence et la modularité des entrepôts par rapport aux pratiques actuelles ainsi que, dans une moindre mesure, l'aptitude à la surveillance des colis, tout en conservant une bonne robustesse en matière de sûreté, éventuellement moyennant l'ajustement de dispositions constructives.

En matière d'aptitude à la durabilité, il n'est pas apparu d'architecture novatrice qui offrirait une potentialité supérieure à celles déjà mises en œuvre industriellement. En effet, le renforcement de la durabilité passe par des dispositions constructives : choix des matériaux, dimensionnement ou de composants spécifiques, plutôt que par un changement d'option d'architecture.

Les options à faible profondeur n'apportent pas, en regard des critères de polyvalence, modularité et aptitude à la durabilité privilégiés dans l'analyse, d'avantages par rapport aux options de surface ou semi-enterrées. En matière de robustesse des dispositifs assurant les fonctions de sûreté, leurs performances ne sont pas non plus discriminantes par rapport à celles des options de surface ou semi-enterrées, ces dernières pouvant être améliorées par des modifications de dimensionnement par exemple. Par contre, elles présentent une plus grande complexité en matière de construction et d'exploitation et corollairement davantage d'aléas.

	Robustesse des fonctions de sûreté	Accessibilité des colis	Polyvalence	Aptitude à la durabilité	Modularité
P4 - Entrepôt avec transstockeur en surface	+++	+++	+++	+++	++
S2 - Entrepôt avec longrines et navettes en surface	+++	+	+++	+++	++
M1 - Entrepôt à faible profondeur	+++	+++	+++	+++	++

Tableau 2 : Synthèse de l'analyse multicritère des concepts d'entreposage de colis de déchets MA-VL

Pour les concepts d'entreposage de déchets MA-VL, l'analyse conduite montre que les concepts étudiés permettent essentiellement d'accroître la polyvalence de ces entrepôts, ce qui est un point important eu égard à la variabilité des colis de déchets MA-VL. En ce qui concerne le choix d'une implantation en surface ou à faible profondeur, comme dans le cas des colis de déchets HA, l'option à faible profondeur étudiée ne présente pas de caractéristique déterminante qui ne puisse être satisfaite par un concept en surface ou semi-enterré, moyennant quelques adaptations, en évitant la complexité introduite par la faible profondeur.

A l'issue de cette analyse multicritère, l'Andra a donc choisi d'approfondir les études de quatre concepts en surface, trois pour les déchets HA, un pour les déchets MA-VL, combinant des options étudiées pendant les études d'esquisses. Ces études sont détaillées dans le bilan remis en 2012 par l'Andra.

Annexe 1

Définition des critères applicables aux différents concepts d'entreposage étudiés

Les 25 critères décrits ci-après sont applicables aux concepts d'entreposage étudiés quel que soit leur type : entreposage de colis de déchets HA ou MA-VL, primaires ou en conteneur de stockage, pour une attente de quelques semaines ou de quelques décennies. Ils découlent directement des spécifications fonctionnelles qui ont servi de base à la définition de ces concepts.

Ces critères sont associés à des niveaux de performance qui sont des grandeurs généralement adimensionnelles liées à des grandeurs caractéristiques des entreposages ou qui correspondent à des graduations sur une échelle de performances. Plus la valeur du critère est grande, plus le niveau de performance est élevé.

Pour toutes les options de conception, le niveau de performance associé à un critère va dépendre du dimensionnement de certains composants. Par exemple, la prolongation possible de la durée d'exploitation va dépendre de l'épaisseur d'enrobage des armatures du béton armé qui détermine la durabilité de la structure.

Le niveau de performance peut dans certain cas, dépendre de l'adjonction ou non de composants annexes qui assurent la ou les fonctions concernées par le critère : par exemple la mise en place d'un système de détection d'incendie qui permet de prévenir ce type de risque.

Le niveau de performance peut également être amélioré par la qualification de certains systèmes. Par exemple, la robustesse vis-à-vis des risques d'explosion dus aux gaz de radiolyse est augmentée si les circuits électriques sont qualifiés pour un fonctionnement en ambiance explosive (spécifications ATEX).

Par conséquent, les niveaux de performance associés aux critères peuvent en général varier dans une fourchette de valeurs. Pour les entreposages en exploitation, ces niveaux de performance sont plutôt caractérisés par une valeur unique.

Comme indiqué au paragraphe 4, ces critères ont été regroupés en cinq rubriques permettant d'apprécier chacun des concepts au regard des exigences s'appliquant aux entreposages étudiés :

- robustesse des fonctions de sûreté,
- accessibilité des colis,
- polyvalence,
- aptitude à la durabilité,
- modularité.

Les paragraphes ci-après décrivent de façon détaillée ces critères ainsi que les niveaux de performance qui leur sont associés.

Les critères relatifs à la robustesse des fonctions de sûreté :

Critère 1 : La défense en profondeur contre la perte de confinement

Ce critère est égal au nombre minimal de barrières de confinement et de systèmes de surveillance de ces barrières qui doivent dysfonctionner simultanément pour qu'une contamination d'une personne du public ou de l'équipe chargée de l'exploitation, se produise.

Ce critère est au minimum égal à 1, car les colis de déchets HA ou MA-VL conditionnés pour être acceptés en stockage ou en entreposage, constituent une barrière de confinement. Les barrières de confinement dynamique sont également comptées : enceintes fermées contenant les colis de déchets et dotées d'une ventilation nucléaire avec filtres de haute ou très haute efficacité, ainsi que les systèmes de détection de la radioactivité contenue dans l'air extrait de cette barrière, dans les aérosols piégés, ou dans les eaux de condensation, etc.

Critère 2 : La détection de la perte de confinement d'un colis et la limitation de la contamination

Le critère est évalué en 6 niveaux suivant la possibilité de détecter et de localiser la contamination qui résulterait de la perte de confinement d'un colis et suivant l'extension de cette contamination.

Niveau 5 du critère : la perte de confinement d'un colis est détectable et localisable dès son apparition par un système de surveillance qui peut être mis en place dans l'option de conception et la contamination reste circonscrite à ce coli et à son voisinage immédiat.

Niveau 4 du critère : la perte de confinement d'un colis est détectable et localisable dès son apparition par un système de surveillance qui peut être mis en place dans l'option de conception, mais la contamination peut atteindre plusieurs colis tout en restant circonscrite à l'intérieur d'une deuxième barrière de confinement.

Niveau 3 du critère : la perte de confinement d'un colis est détectable dès son apparition par un système de surveillance qui peut être mis en place dans l'option de conception. Elle n'est localisable qu'au niveau d'une alvéole contenant plusieurs colis. La contamination qui peut atteindre plusieurs colis reste circonscrite à l'intérieur d'une barrière de confinement.

Niveau 2 du critère : la perte de confinement d'un colis est détectable dès son apparition par un système de surveillance qui peut être mis en place dans l'option de conception. Elle n'est pas localisable et la contamination peut le cas échéant atteindre l'ensemble de l'entrepôt, mais elle y reste circonscrite.

Niveau 1 du critère : la perte de confinement d'un colis n'est pas détectable avant la dispersion de la contamination qu'elle provoque, mais elle reste circonscrite à l'intérieur de l'entrepôt.

Niveau 0 du critère : la perte de confinement d'un colis n'est pas détectable avant la dispersion de la contamination qu'elle provoque. Par conception il n'est pas assuré que cette contamination reste circonscrite à l'intérieur de l'entrepôt.

Critère 3 : la protection contre les rayonnements ionisants

Ce critère évalue les précautions prises pour protéger les travailleurs, le public et l'environnement d'une irradiation ainsi que pour protéger les systèmes installés dans l'entreposage des altérations dues aux rayonnements.

Il est évalué en 6 niveaux suivant le nombre de caractéristiques spécifiques présentées parmi les 5 suivantes :

Des procédures d'exploitation peuvent être mises en place pour que deux écrans de radioprotection au moins, soient toujours interposés entre les colis et les travailleurs les plus exposés. Un seul de ces écrans suffirait pour assurer que la dose d'irradiation reçue par les travailleurs, reste inférieure aux limites réglementaires, en prenant en compte un effet de ciel éventuel que la disposition des écrans laisse prévoir.

Les écrans de radioprotection sont dimensionnés pour résister aux accidents de dimensionnement d'origine interne les plus sévères : chute ou choc de colis, incendie, etc.,

Une perte partielle de la radioprotection ne peut pas résulter d'une erreur humaine ou d'un seul incident (perte de l'alimentation électrique ou de réseaux de contrôle, par exemple). Si plusieurs types d'incidents peuvent provoquer cette perte, il faut pouvoir montrer que leur occurrence est indépendante ; en d'autres termes qu'il n'existe pas de cause commune de déclenchement.

Les phénomènes d'altération de l'atmosphère ou des matériaux de l'entreposage induits éventuellement par l'irradiation : ionisation, radiolyse, etc., sont surveillés et des dispositions de protection sont prises.

La décroissance des rayonnements émis par un colis ou un groupe de colis, peut être suivie en entreposage, sans retrait ou manipulation du ou des colis.

Le niveau de performance associé au critère varie de 0 à 5 en fonction du nombre des caractéristiques, parmi les précédentes, qui sont satisfaites par l'entreposage.

Critère 4 : La défense vis-à-vis d'un accident de criticité

Ce critère est évalué en 6 niveaux suivant le nombre de dispositions qui peuvent être implantées dans l'entreposage pour maintenir la sous-criticité de l'empilement des colis HA ou MA-VL, pour la surveiller et pour limiter les conséquences d'un accident de criticité, s'il se produisait :

Il est démontré qu'un empilement infini de colis suivant la maille prévue par conception dans l'entreposage, est sous critique en supposant que la quantité de matière fissile contenue dans chaque colis est égale à la valeur maximale spécifiée.

La géométrie de l'empilement des colis est préétablie par l'architecture de l'entrepôt, par exemple par des puits ajustés aux dimensions des colis qui empêchent en particulier un rapprochement inopiné des matières fissiles par erreur de manutention ou du fait d'un séisme.

Le dimensionnement de l'entrepôt rempli de colis avec les hypothèses les plus pessimistes du point de vue du risque de criticité, aboutit à des coefficients de multiplication effectifs (keff) très inférieurs à 1, en particulier en cas de submersion par inondation de l'entreposage, si cet accident est possible.

La zone d'entreposage est divisée en alvéoles isolées par des barrières constituées de matériaux contenant des poisons neutroniques.

Le rayonnement neutronique fait l'objet d'un suivi continu dans les parties les plus sensibles de l'empilement des colis.

Le niveau de performance associé au critère varie de 0 à 5 en fonction du nombre des caractéristiques, parmi les précédentes, qui sont satisfaites par l'entreposage.

Critère 5 : La protection contre les gaz radioactifs

Les entreposages qui accueillent des colis de combustibles usés susceptibles de relâcher des radionucléides gazeux : ^3H , ^{39}Ar , ^{85}Kr ... ou des colis MA-VL contenant des sources ou des déchets contenant des radionucléides gazeux : ^3H , ^{12}C , ^{36}Cl , ^{129}I , ou des radionucléides : thorium ou radium générant par désintégration des radionucléides gazeux : ^{220}Rn et ^{222}Rn , doivent assurer une protection des travailleurs et du public contre une contamination radioactive par inhalation.

Ce critère est évalué en 6 niveaux suivant le nombre de dispositions qui peuvent être implantées dans l'entreposage pour surveiller, confiner ou relâcher de manière contrôlée les gaz radioactifs :

Le système de surveillance permet de mesurer l'activité des radionucléides gazeux relâchés par un colis ou un groupe de colis particuliers.

Une barrière de confinement est conçue pour être étanche au gaz (barrière statique) ou pour piéger les gaz radioactifs (barrière dynamique).

L'activité des radionucléides gazeux présents dans l'air de l'entreposage est mesurée.

Le circuit de ventilation de l'entreposage est équipé d'un système permettant de piéger certains radionucléides gazeux.

Le système de ventilation de l'entreposage est conçu pour diluer les gaz radioactifs lourds : radon, xénon, krypton, argon, iode, chlore, ... ou légers : tritium, hydrocarbures, etc. avant d'effectuer des rejets contrôlés dans l'atmosphère.

Le niveau de performance associé au critère varie de 0 à 5 en fonction du nombre des caractéristiques, parmi les précédentes, qui sont satisfaites par l'entreposage.

Critère 6 : La limitation des risques associés à la chute de colis

La chute d'un colis en cours de manutention dans l'entreposage est un incident qui doit être pris en compte. Le concepteur doit s'assurer qu'elle ne provoquera pas de dispersion de la matière radioactive, quelles que soient les circonstances.

Le critère ne prend en compte que les paramètres intrinsèques à l'entreposage liés à la probabilité d'occurrence d'une chute et à la gravité de ses conséquences. C'est ainsi que le nombre de ruptures de charge entre la première saisie par les moyens de manutention et le

placement en position d'entreposage est pris en considération, mais que la résistance à la chute des colis ne l'est pas.

Pour la même raison, la hauteur maximale de chute potentielle durant l'exploitation de l'entreposage est prise en compte. Dans certaines phases de manutention le colis peut être maintenu à grande hauteur au-dessus d'un système d'amortissement qui garantit l'intégrité du colis en cas de chute. Le risque est alors lié à la défaillance de ce système. Le critère ne prend donc pas en compte cette hauteur de chute. De même la manutention dans des paniers ou colis de regroupement qui réduit le nombre d'opérations mais qui augmente probablement ces conséquences potentielles, n'est pas pris en considération.

Le niveau de performance associé à ce critère est calculé en multipliant par 5 la hauteur du colis divisée par la plus grande hauteur de survol au-dessus d'une surface dépourvue de système d'amortissement. Cette grandeur est divisée par le nombre de rupture de charge dans la manutention du colis qui est en général égal à celui des systèmes de manutention assurant la chaîne cinématique des colis.

Par exemple ce critère est égal à 1 si, en utilisant uniquement un pont roulant, les colis sont empilés sur 5 niveaux dans un hall ou une fosse. Il ne peut pas être nul, par contre il peut être inférieur à 1 ou supérieur à 5. Par souci d'uniformisation sa valeur sera ramenée à l'entier le plus proche compris entre 0 et 5.

Critère 7 : La limitation des risques d'explosion :

Les risques d'explosion en entreposage sont liés en premier lieu à la production d'hydrogène gaz et secondairement d'hydrocarbures gazeux (méthane) par radiolyse provoquée principalement par les rayonnements des déchets, dans l'eau et les matières organiques contenues dans les colis. D'autres sources d'hydrogène gaz peuvent également être présentes en entreposage, associées aux batteries à électrolytes.

Enfin le risque d'explosion dû à la présence éventuelle en entreposage de réservoirs de gaz sous pression ou de matières chimiquement réactives au contact de l'air ou entre elles doit être pris en compte.

Ce critère est évalué en 6 niveaux en fonction du nombre de dispositions qui peuvent être prises dans l'entreposage parmi les suivantes, considérées comme les plus efficaces pour limiter le risque d'explosion :

En fonctionnement normal la ventilation permet un renouvellement complet de l'air contenu dans l'entrepôt en une période de temps inférieure à une journée.

En cas d'arrêt accidentel de la ventilation, le volume libre de l'entrepôt est suffisant pour que la concentration en gaz de radiolyse n'y atteigne la limite d'explosivité qu'après au moins un mois, en supposant que chacun des colis entreposés, relâche 20 litres d'hydrogène par an.

L'entrepôt ne renferme pas, même provisoirement pour les besoins de la maintenance, de source potentielle d'explosion : réservoir de gaz sous pression, lot de batteries à électrolyte, etc. Il ne renferme pas de matières solides ou liquides qui par réactions chimiques avec l'air ou entre elles, pourraient les produire.

Les volumes libres dans l'empilement des colis qui ne sont pas accessibles au renouvellement d'air par la ventilation, sont ouverts par en haut et permettent l'évacuation des gaz légers (hydrogène, méthane, etc.) par effet de densité.

Les colis sont entreposés à distance les uns des autres et le volume libre est balayé par l'air de ventilation.

Le niveau de performance associé au critère varie de 0 à 5 en fonction du nombre des caractéristiques, parmi les précédentes, qui sont satisfaites par l'entreposage.

Critère 8 : La limitation des risques d'incendie

Les risques d'occurrence dépendent essentiellement de la présence de matières combustibles dans les colis de déchets qui peuvent être aggravés si les installations d'entreposage contiennent également des matières combustibles : carburant, matériaux inflammables. Ils dépendent également de la présence de facteurs potentiels d'ignition : moteur thermique, circuit électriques.

Enfin les conséquences d'un incendie seront limitées si l'entrepôt peut être segmenté en zones séparées par des cloisons pare-feu et si une ventilation de secours permet d'évacuer les fumées tout en piégeant les particules combustibles (suie).

Ce critère est évalué en 6 niveaux en fonction du nombre de dispositions qui peuvent être adoptées dans l'entreposage parmi les suivantes qui sont considérées comme efficaces pour prévenir un incendie ou en limiter les conséquences :

L'entrepôt est construit avec des matériaux incombustibles et les éléments de structure ont une grande stabilité au feu.

Les systèmes de manutention n'utilisent pas de moteur à explosion avec réservoir de carburant et les camions qui apportent ou emmènent les colis ne pénètrent pas dans l'entrepôt.

Les circuits électriques peuvent être limités à l'éclairage, aux systèmes de surveillance et de communication, alimentés en courants faibles.

L'entreposage est segmenté en zones qui peuvent être séparées par des murs et des portes pare-feu.

Le système de ventilation peut fonctionner en secours pour évacuer les fumées, car celles-ci peuvent être traitées : piégeage des suies et des particules combustibles.

Le niveau de performance associé au critère varie de 0 à 5 en fonction du nombre des dispositions précédentes qui peuvent être implantées dans l'entreposage.

Critère 9 : La limitation des risques d'inondation

L'inondation en entreposage est un accident susceptible d'affecter gravement les systèmes qui assurent des fonctions de sûreté. Pour les entreposages accueillant des colis qui contiennent des radionucléides fissiles, l'inondation par l'eau est un facteur qui aggrave le risque de criticité.

L'inondation est essentiellement un accident d'origine externe provoqué par l'eau de pluie, ou provenant de cours d'eau (de la mer si le risque de raz de marée existe) ou encore des aquifères.

L'inondation des parties basses d'un entreposage peut également être provoquée par un accident d'origine interne : accumulation par condensation de la vapeur d'eau atmosphérique, ou par fuite de liquide provenant de circuits hydrauliques ou de réservoirs.

Ce critère est évalué en 6 niveaux en fonction du nombre de dispositions qui peuvent être adoptées dans l'entreposage parmi les suivantes qui sont considérées comme efficaces pour prévenir une inondation ou en limiter les conséquences :

Les composants assurant le drainage des eaux, la détection de l'inondation puis l'évacuation des fluides : rigoles, cuvelages, caniveaux, puisards, pompes et conduites peuvent être rendus directement accessibles aux opérateurs, dans le cadre d'une maintenance de routine.

L'entreposage est construit au-dessus du niveau le plus haut de l'aquifère ou les parois et voûtes au contact de cet aquifère peuvent être rendues directement accessibles aux opérateurs pour une surveillance de routine.

Les fluides accumulés en parties basses de l'entrepôt peuvent être évacués à l'extérieur par gravité (sans recourir à un circuit de relevage avec pompe).

L'entreposage ne comporte pas de réservoir ou de circuit contenant des fluides sous pression ou susceptibles de se répandre en quantité.

Le circuit de ventilation ne comporte pas de zones froides, dans lesquelles la vapeur d'eau atmosphérique serait susceptible de se condenser et de s'accumuler.

Le niveau de performance associé au critère varie de 0 à 5 en fonction du nombre des dispositions précédentes qui peuvent être implantées dans l'entreposage.

Critère 10 : Les sources d'énergie secourues pour les systèmes assurant des fonctions principales ou de sûreté

Dans certains concepts d'entreposage, les systèmes qui assurent les fonctions de sûreté :

- le confinement des matières radioactives,
- la limitation de l'exposition externe aux rayonnements ionisants gamma et neutrons,
- la maîtrise de la criticité,
- l'évacuation de la puissance thermique et des gaz explosifs,

dépendent d'une source d'énergie. Dans ce cas les alimentations sont surveillées et pour pallier à une panne, elles sont nécessairement secourues.

Les systèmes de manutention des colis qui sont associés aux fonctions principales : accueillir, conserver puis transmettre les colis de déchets, dépendent d'une source d'énergie électrique qui peut être transmise sous formes hydraulique ou pneumatique pour la préhension, le lavage et les transports ou de moteurs thermiques.

La défaillance de ces systèmes peut avoir des conséquences pour la sûreté : l'immobilisation d'un colis en hauteur ou sur un chemin de transfert peut créer un risque ou induire une exposition aux rayonnements pour les opérateurs. A ce titre l'alimentation électrique de ces systèmes est secourue et des systèmes de dépannage sont prévus.

La défaillance de tous ces systèmes par rupture intrinsèque de composants, du fait d'un incident d'origine interne ou d'agression externe, doit être détectée par des systèmes d'auscultation et de surveillance des paramètres significatifs.

Dans certains concepts d'entreposage, la surveillance est nécessairement télé-opérée et recourt à des réseaux de communication alimentés en courants faibles.

Ce critère est évalué en 6 niveaux suivant le nombre de systèmes qui dépendent d'une source d'énergie extérieure secourue, qu'il faut nécessairement prévoir dans l'entreposage pour assurer les fonctions de sûreté et pour les surveiller. Ces systèmes sont des moteurs actionnant des ventilateurs, des pompes, des portes, des bouchons ou des dalles de radioprotection, etc.

Le critère prend en compte également le fait qu'un arrêt de l'alimentation ou qu'une panne des systèmes de manutention est susceptible, par conception de l'entreposage, d'avoir des conséquences pour la sûreté et qu'il y a donc nécessité de secourir cette alimentation et/ou de prévoir un système de dépannage télé-opéré.

Niveau 5 du critère : les fonctions de sûreté sont assurées par des systèmes passifs et la manutention par des systèmes dont la défaillance n'entraîne aucune conséquence pour la sûreté ou par des systèmes qui sont accessibles et réparables par intervention directe des opérateurs. Les fonctions de sûreté peuvent être surveillées par des systèmes qui ne sont pas télé-opérés ou qui peuvent être contrôlés directement par les opérateurs.

Niveau 4 du critère : La sûreté de l'entreposage dépend au moins d'un système fonctionnant avec une source d'énergie secourue. Ce système peut éventuellement être le système de manutention si la panne de celui-ci a des conséquences sur la sûreté. Ce niveau du critère s'applique également au cas où un des systèmes qui assurent la surveillance des fonctions de sûreté de l'entreposage doit être télé-opéré, sans possibilité de contrôle direct par les opérateurs.

Niveau 3 du critère : Le concept d'entreposage implique au moins deux systèmes importants pour la sûreté fonctionnant avec une source d'énergie secourue ou deux systèmes télé-opérés qui assurent la surveillance des fonctions de sûreté ou encore un système de chacun des deux types précédents.

Niveau 2 du critère : Le concept d'entreposage implique au moins 3 systèmes parmi ceux qui assurent des fonctions de sûreté ou la surveillance de ces fonctions qui ont les caractéristiques précédentes.

Niveau 1 du critère : Le concept d'entreposage implique au moins 4 systèmes du type précédent.

Niveau 0 du critère : Le concept d'entreposage implique plus de 4 systèmes du type précédent.

Critère 11 : La robustesse de l'entreposage vis-à-vis du risque de séisme

La tenue de la structure d'un entreposage et des systèmes qui l'équipent est évaluée par référence aux séismes majorés de sécurité (SMS) et aux séismes maximaux historiquement vraisemblables (SMHV) liés à la zone d'implantation, en application de la RFS 2001-1.

La robustesse d'un concept d'entreposage vis-à-vis du risque de séisme est appréciée en fonction de la sensibilité du dimensionnement de ses composants aux caractéristiques de ces séismes de référence.

Ce critère est évalué en 6 niveaux suivant la complexité des modifications qu'il faudrait apporter à un avant-projet en cas d'exigence parasismique plus élevée :

L'empilement des colis est stable par conception de l'entreposage, ce qui rend inutile l'implantation d'un système qui maintiendrait la rectitude de cet empilement sous séisme.

Le système de manutention se déplace sur rails et peut être rendu stable aux séismes dans toutes les configurations d'exploitation, moyennant des dispositions mineures.

Le transfert des colis ne passe pas par des phases de suspension par câble sur de grande hauteur qui pourraient en cas de séisme, se traduire par des oscillations qui ne seraient pas empêchées.

Le système de refroidissement ne comporte pas de structure haute : cheminée, échangeurs, etc. dont le dimensionnement dépend du séisme majoré de sécurité.

La structure de l'entrepôt est favorable à sa tenue parasismique : hall de petites dimensions, localisation à faible profondeur ou sous remblai.

Le niveau de performance associé au critère varie de 0 à 5 en fonction du nombre des caractéristiques, parmi les précédentes, qui sont satisfaites par l'entreposage.

Critère 12 : La robustesse de l'entreposage vis-à-vis du risque de chute d'avion

La probabilité pour que la chute d'un avion sur l'entreposage entraîne un impact inacceptable sur la population et le milieu environnant doit rester inférieure à une limite qui est fixée par la RFS I.1.a.

La robustesse d'un concept d'entreposage vis-à-vis du risque de chute d'avion est fonction d'une part du nombre de composants de l'entrepôt qui assurent une fonction de sûreté et qui peuvent constituer des cibles pour un impact d'aéronefs et d'autre part de la probabilité que ces composants soient détruits par l'impact.

Ce critère est évalué en 6 niveaux suivant la possibilité de subdiviser les composants sensibles de l'entrepôt en plusieurs cibles distinctes et suivant leur résistance à un impact d'avion :

Le système de refroidissement est doté d'entrées et de sorties d'air multiples qui peuvent être placées à distance. Si l'une d'entre elles est obturée, les autres peuvent suppléer à sa défaillance et assurer la continuité d'un refroidissement.

Le système de refroidissement n'est pas tributaire de cheminées ou d'échangeurs thermiques atmosphériques.

Les colis sont entreposés dans des modules qui peuvent être disposés à distance.

Les colis sont entreposés dans une structure située à faible profondeur ou recouverte d'un remblai d'épaisseur multi-métrique.

Dans le périmètre de l'entreposage, la manutention des colis est assurée sous hotte ou en emballage de transport, à l'intérieur de structures en béton armé.

Le niveau de performance associé au critère varie de 0 à 5 en fonction du nombre des caractéristiques, parmi les précédentes, que peut présenter l'entreposage.

Critère 13 : la robustesse de l'entreposage vis-à-vis des risques industriels et de transport

La structure d'un entreposage et les systèmes qui l'équipent doivent résister, en application de la RFS I.1.b, aux agressions qui résulteraient d'un sinistre qui se produirait à proximité, dans une installation industrielle ou sur des voies de circulation routière, ferroviaire, fluviale ou maritime.

Les agressions à envisager d'après cette règle, sont :

- une élévation de température due à la propagation d'un incendie,
- une onde de pression due à une explosion,
- une onde sismique due à une explosion,
- des chocs de projectiles émis par une explosion,
- des nappes ou nuages dérivants de gaz toxiques ou corrosifs et des gaz et fumées résultants d'un incendie.

Ce critère est évalué en 6 niveaux suivant la complexité des modifications qu'il faudrait apporter à un avant-projet conçu pour une zone où les risques liés à l'environnement industriel et aux voies de communication sont minimales pour l'adapter à une zone où ce risque existe :

L'entreposage est doté d'un système de ventilation qui peut être obturé rapidement et rester fermé pendant une semaine, sans mettre en péril les installations d'entreposage et les colis de déchets par élévation de température.

Le système de refroidissement n'est pas tributaire de cheminées ou d'échangeurs thermiques atmosphériques, susceptibles d'être endommagés par le souffle d'une explosion.

Les colis sont entreposés dans une ou des structures de faible hauteur, semi enterrées ou construites à faible profondeur.

Les structures d'entreposage sont construites avec des matériaux incombustibles, ayant une bonne tenue au feu.

Les systèmes assurant une fonction de sûreté ou de surveillance sont protégés à l'intérieur de structures qui garantissent leur protection.

Le niveau de performance, de 0 à 5, associé au critère est égal au nombre de caractéristiques, parmi les 5 précédentes, que possède le concept.

Les critères relatifs à l'accessibilité des colis :

Critère 14 : L'accessibilité aux colis pour examen ou mesure non destructive en place

La surveillance des colis en entreposage contribue à sa sûreté, car les colis assurent des fonctions de sûreté : confinement des radionucléides, contribution à la radioprotection des travailleurs et du public, maîtrise de la criticité, etc.

D'autre part la surveillance des colis en entreposage peut contribuer au contrôle de la conformité de certaines de leurs caractéristiques aux spécifications d'acceptation en stockage ou au contrôle de la décroissance de leur puissance thermique ou de leur production de gaz de radiolyse, qui constituerait un préalable à leur stockage.

Le niveau de performance de ce critère est obtenu en divisant par le nombre total de colis entreposés, le nombre de colis qui peuvent en principe, être rendus accessibles pour au moins un examen ou une mesure non destructive en entreposage, sans avoir à les déplacer ou les manipuler.

Etant par construction compris entre 0 et 1, ce nombre est multiplié par 5 et arrondi à l'entier le plus proche, par souci d'uniformisation.

Critère 15 : L'accessibilité pour contrôle ou prélèvement de colis

La surveillance des colis comprend éventuellement des contrôles périodiques destructifs ou non destructifs, effectués dans une installation de contrôle appropriée, sur un échantillon de la population des colis entreposés. La densité de cette surveillance et la charge qu'elle représente ne dépendent pas de l'option de conception choisie, sinon par la plus ou moins grande complexité des opérations de manutention qu'il faudra réaliser pour retirer un colis donné de l'entreposage.

Le niveau de performance de ce critère est égal à l'inverse du nombre de colis qu'il faut manipuler dans le cas le plus défavorable pour pouvoir prélever un colis dans l'entreposage.

Etant compris entre 0 et 1, ce nombre est multiplié par 5 et arrondi à l'entier le plus proche. De cette façon, pour un entreposage dans lequel tous les colis restent directement accessibles, le critère est égal à 5. S'il faut 2 manutentions dans le cas le plus défavorable, le critère est égal à 3. S'il en faut 3, il est égal à 2 et s'il en faut entre 4 et 10, il est égal à 1. Au-delà de 10, il est égal à 0.

Les critères relatifs à la polyvalence

Critère 23 : L'adaptabilité de l'entreposage à des flux simultanés de colis HA et MA-VL différents

Ce critère est égal au nombre de colis types HA et MA-VL du modèle d'inventaire de dimensionnement (MID), ayant des caractéristiques externes différentes : dimensions, géométrie des organes de préhension, masse, débit de dose, etc. pouvant être simultanément entreposés.

Les colis types qui peuvent être entreposés sous la forme de colis primaires et de colis de stockage, sont comptés deux fois pour l'établissement de cet indice qui par souci d'unification, sera plafonné à 5. L'adaptabilité qui correspond à cette valeur de l'indice, peut être considérée comme optimale compte tenu des besoins d'entreposage actuellement identifiés.

Critère 24 : L'adaptabilité de l'entreposage à des flux simultanés de colis HA et MA-VL de puissances thermiques différentes

Ce critère est essentiellement applicable aux entreposages qui contiennent pendant de longues périodes, à la fois des colis de déchets vitrifiés de 500 à 2000 W avec d'autres colis de puissance thermique faible ou nulle.

Dans ce cas, le système de refroidissement doit éviter les points chauds au voisinage des colis fortement exothermiques comme dans ces colis avec pour conséquence le risque d'une excursion en température au-delà des valeurs admissibles et simultanément, les points froids où la vapeur d'eau pourrait se condenser et entraîner une corrosion des parties métalliques.

Pour un colis HA du type CSD-V, le maintien de conditions de corrosion sèche au contact des conteneurs et le respect des températures limite au cœur du bloc de déchets vitrifiés sont plus difficiles à obtenir, à puissance thermique égale, sur un colis de stockage que sur un colis primaire. Dans le premier cas, la surface d'échange par laquelle la puissance thermique est évacuée, est plus grande et par conséquent toutes choses étant égales par ailleurs, la température en surface extérieure du conteneur est plus faible alors que la température à cœur est plus forte.

La possibilité d'accueillir simultanément des colis dépourvus de puissance thermique et des colis de déchets HA moyennement thermiques ou encore des colis MA-VL faiblement thermiques de coques et embouts ou de certains déchets technologiques cimentés ou compactés dépend de la robustesse du système de ventilation. En effet, ces colis ne peuvent induire d'élévations de température importantes qu'en cas d'arrêt de la ventilation.

Ce critère est évalué en 6 niveaux, suivant la capacité à respecter les limites hautes et basses de température dans les matériaux des colis et de l'entreposage tout en accueillant simultanément des colis présentant un contraste de puissance thermique fort ou modéré moyennant des dispositions particulières.

Niveau 5 du critère : le concept d'entreposage permet d'envisager un accueil simultané de colis primaires HA très exothermiques (2 000 W à 1 500 W) et d'autres dépourvus de puissance thermique, sans avoir à adopter de mesures particulières pour le placement des colis et la gestion du système de refroidissement.

Niveau 4 du critère : le concept présente la possibilité de gérer en entreposage dans les mêmes conditions que pour le niveau 5, portant sur le placement et la ventilation, des colis qui présentent un contraste thermique moins fort : colis primaires HA très exothermiques (2 000 W à 1 500 W) et colis primaires HA de puissance thermique de l'ordre de 250 W ou colis de stockage de 500 W.

Niveau 3 du critère : le concept permet d'envisager un accueil simultané de colis primaires HA très exothermiques (2 000 W à 1 500 W) et d'autres colis dépourvus de puissance thermique. Toutefois les colis doivent être placés durant toute la période d'entreposage dans des sous-ensembles : fosses, puits, alvéoles distincts soumis à des conditions de ventilation différenciées.

Niveau 2 du critère : le concept possède la même capacité qu'au niveau précédent mais pour des colis qui présentent un contraste thermique moins fort : colis HA très exothermiques (2 000 W à 1 500 W) et colis primaires HA de puissance thermique de l'ordre de 250 W ou colis de stockage de 500 W.

Niveau 1 du critère : le concept permet d'envisager un accueil simultané de colis qui présentent le contraste thermique précédent : colis HA très exothermiques (2 000 W à 1 500 W) et colis primaires HA de puissance thermique de l'ordre de 250 W ou colis de stockage de 500 W, en modifiant la disposition des colis et leur condition de ventilation au cours de leur période d'entreposage.

Niveau 0 du critère : l'option de conception ne permet pas d'envisager l'entreposage simultané de colis HA très exothermiques (2 000 W à 1 500 W) et de colis primaires HA de puissance thermique de l'ordre de 250 W ou colis de stockage de 500 W.

Critère 25 : L'adaptabilité de l'entreposage à des flux successifs de colis différents

Les flux de colis futurs proviendront en grande partie, de productions actuellement mal définies ou carrément inconnues. Il faut donc envisager des variations de grandes amplitudes (doublement par exemple) des caractéristiques des colis.

Ce critère est évalué en 6 niveaux, suivant le nombre de caractéristiques dont la variation simultanée est envisageable moyennant des adaptations sur les équipements amovibles par conception : manutention, hotte de radioprotection, ventilateur, etc. sans toutefois entraîner de refonte des équipements fixes : alvéoles, puits d'entreposage, écran de radioprotection, section ventilée, etc.

Niveau 5 du critère : l'entreposage est adaptable aux variations de grandes amplitudes des 5 paramètres suivants du colis pour lequel il a été étudié :

- masse,
- hauteur,
- section (diamètre du cercle ou côté du carré),
- puissance thermique
- débit de dose au contact.

Les niveaux inférieurs décroissent de 5 à 0, suivant le nombre de caractéristiques précédentes des colis qui peuvent varier sans entraîner d'impossibilité d'accueil dans l'entreposage, celui-ci étant éventuellement préparé pour cela.

Les critères relatifs à l'aptitude à la durabilité

Critère 16 : Le refroidissement des colis et des installations d'entreposage

Dans un entreposage de colis de déchets exothermiques, la température des colis et des systèmes assurant des fonctions de sûreté doit rester en deçà de limites acceptables. Pour cela la puissance thermique des colis doit être évacuée à l'extérieur de l'entreposage, en fonctionnement normal comme en cas d'incident.

Le système de refroidissement doit être robuste, c'est-à-dire qu'il doit garantir le respect des températures limites, après un incident ou un accident d'origine interne ou externe. La robustesse dépend, entre autres de la facilité de surveillance et de la maintenance.

Ce critère est évalué en 6 niveaux suivant le nombre de systèmes actifs qui doivent fonctionner pour assurer la fonction de refroidissement :

Niveau 5 du critère : en l'absence de convection (arrêt de la circulation du fluide de refroidissement), les échanges thermiques par diffusion à travers l'air et/ou les parois de l'entreposage ou par rayonnement sont suffisants pour garantir la fonction.

Niveau 4 du critère : la convection est assurée par thermo siphonage ou par tirage naturel dans un circuit sans régulation manuelle ou automatique du débit et qui ne comporte pas de cheminée, ni d'échangeur thermique extérieur, dont la taille serait suffisante pour qu'il constitue une cible à envisager dans les scénarios d'agression externe.

Niveau 3 du critère : le maintien de la convection naturelle dépend d'une cheminée ou d'un échangeur thermique extérieur qui peut constituer une cible, ou encore ce maintien demande en certaines circonstances une intervention d'un opérateur, qui s'effectue directement ou par le biais d'un système de contrôle commande pour actionner par exemple un registre ou une vanne réglant le débit du fluide de refroidissement.

Niveau 2 du critère : la convection en fonctionnement normal est forcée. En cas de panne le refroidissement peut être assuré pendant plusieurs jours par convection naturelle mais dépend de l'intervention d'un opérateur. Le circuit de refroidissement comporte des structures : registre, cheminée, échangeur thermique, etc., dont la taille est suffisante pour qu'il constitue une cible à envisager dans les scénarios d'agression externe.

Niveau 1 du critère : le respect des températures maximales acceptables dans les colis et l'entreposage est tributaire du fonctionnement continu d'un système mécanique de ventilation ou de pompage nécessitant une alimentation en énergie extérieure.

Niveau 0 du critère : le respect de ces températures maximales dépend du bon fonctionnement de plusieurs systèmes mécaniques ; par exemple, de ventilation et de réfrigération.

Critère 17 : La protection contre le vieillissement atmosphérique des colis et des installations d'entreposage

Dans un entreposage, les conditions internes d'environnement doivent garantir une durabilité des colis qui soit compatible avec leur durée d'entreposage et qui permettent ensuite leur stockage. Elles doivent également être compatibles avec le maintien en fonctionnement de la structure et des systèmes qui ne sont pas accessibles pendant la durée prévue d'exploitation.

Les fluides circulant au contact des colis et dans l'entreposage : l'air atmosphérique et un éventuel fluide caloporteur spécifique, doivent être maintenus à une température, une humidité et une composition chimique favorables à la durabilité des matériaux constitutifs : liants hydrauliques, métaux, etc.

Ce critère est évalué en 6 niveaux suivant le nombre de dispositions qui peuvent être implantées dans l'entreposage afin de garantir des conditions favorables à la durabilité des matériaux :

La composition chimique du fluide au contact des colis garantit que les matériaux de colisage ne seront pas altérés.

La puissance thermique des colis de déchets réchauffe l'air circulant dans l'entreposage. Le flux d'air est régulé pour maintenir un abaissement suffisant de son humidité relative pendant la décroissance thermique en entreposage.

L'air atmosphérique est chauffé à l'entrée du circuit de ventilation de l'entreposage pour abaisser son humidité relative et garantir l'absence de condensation sur les pièces métalliques les plus froides.

Les gaz acides : gaz carbonique, oxydes d'azote, de soufre, etc. sont piégés en entrée du circuit de ventilation de l'entreposage.

Les poussières et les aérosols (embruns, brouillards) sont piégés en entrée du circuit de ventilation de l'entreposage.

Le niveau de performance associé au critère varie de 0 à 5 en fonction du nombre des dispositions précédentes qui peuvent être implantées dans l'entreposage.

Critère 18 : L'accessibilité aux installations d'entreposage pour surveillance et maintenance

La complexité de la surveillance et de la maintenance des systèmes qui assurent des fonctions de sûreté ou de service dans l'entrepôt, va dépendre en partie de leur accessibilité pour les opérateurs, c'est-à-dire de la possibilité de les placer en zones simplement surveillées ou contrôlées et d'éviter de les placer en zones spécialement réglementées ou interdites.

Tout système placé en zone interdite ne pourra être surveillé et réparé que par télé-opération. Cela est généralement vrai aussi pour ceux qui sont placés en zones spécialement réglementées, qui ne peuvent être rendus accessibles que dans le cadre de procédures particulières qui perturbent généralement l'exploitation.

Ce critère est évalué en 6 niveaux suivant la facilité d'accès aux composants de l'entrepôt :

Niveau 5 du critère : à l'exception des fosses, puits ou alvéoles contenant les colis de déchets, l'ensemble de la structure et des systèmes de l'entrepôt, en particulier les systèmes de manutention et de refroidissement, peuvent être rendus accessibles pendant les phases normales d'exploitation.

Niveau 4 du critère : la même accessibilité qu'au niveau 5 peut être obtenue, dans le cadre de procédures simples à mettre en œuvre qui interrompent l'exploitation mais qui ne nécessitent pas le déplacement de colis déjà entreposés.

Niveau 3 du critère : les procédures normales de surveillance et de maintenance de tout ou partie de l'un des ensembles suivants : la structure (autre que les fosses, les puits ou les alvéoles d'entreposage), le système de refroidissement - ventilation ou les appareils de manutention impliquent des télé-opérations (par exemple le repli vers une zone surveillée ou contrôlée) ou des opérations lourdes avec déplacements de colis entreposés.

Niveau 2 du critère : les procédures normales de surveillance et de maintenance par télé-opérations s'étendent à tout ou partie de deux des trois ensembles suivants : la structure (autre que les fosses, les puits ou les alvéoles d'entreposage), le système de refroidissement-ventilation, les appareils de manutention.

Niveau 1 du critère : les procédures normales de surveillance et de maintenance par télé-opérations s'étendent à tout ou partie des trois ensembles suivants : la structure autre que les fosses, les puits ou les alvéoles d'entreposage, le système de refroidissement - ventilation, les appareils de manutention.

Niveau 0 du critère : les procédures normales de surveillance et de maintenance sont entièrement réalisées par télé-opérations.

Critère 19 : L'aptitude de l'entreposage à une exploitation de longue durée

Les concepts d'entreposage peuvent rendre plus ou moins difficile une exploitation sur la durée, en fonction des possibilités qu'ils créent de placer les structures et les systèmes dans des conditions d'environnement internes favorables en réduisant a priori les sollicitations thermiques, chimiques, mécaniques et radioactives sur les matériaux.

Ce critère est évalué en 6 niveaux suivant les caractéristiques de l'environnement interne de l'entreposage, favorables à la durabilité des matériaux qui peuvent être envisagées dans l'option de conception :

L'humidité relative de l'air peut être contrôlée et le risque de condensation de la vapeur d'eau dans les parties les plus froides est évité.

Les fluctuations de températures peuvent être contrôlées dans l'air intérieur, ce qui permet d'exclure les températures négatives et les températures supérieures à 80 °C dans les bétons, en fonctionnement normal.

Les structures en béton armé de l'entrepôt ne sont pas soumises à des contraintes de tractions susceptibles de créer une fissuration dommageable.

La structure et les équipements fixes de l'entrepôt sont protégés des effets directs de l'irradiation gamma ainsi que de ses effets indirects : les gaz acides issus de la radiolyse de l'air atmosphérique.

L'atmosphère intérieure ne contient pas d'aérosols : poussières, vésicules salines, etc.

Le niveau de performance associé au critère varie de 0 à 5 en fonction du nombre de conditions favorables, parmi celles ci-dessus, qui sont remplies par le concept d'entreposage.

Les critères relatifs à la modularité

Critère 20 : La construction par modules

Un surcroît du flux de colis entrant dans l'entreposage, sur le flux sortant, qui se prolongerait dans le temps ou un afflux circonstanciel de colis, nécessiteraient une augmentation de capacité, plus facile à réaliser si la conception de l'entreposage est modulaire

L'adaptabilité du concept à un redimensionnement de sa capacité peut alors être appréciée en fonction du délai disponible pour décider puis construire un module supplémentaire. Ce délai est fonction du temps de remplissage du module en exploitation.

L'évaluation du niveau de performance de ce critère est basée sur la mise en rapport de la capacité d'un module de l'entreposage avec le temps nécessaire à sa construction. Un temps de remplissage de référence du module est calculé en divisant sa capacité par un flux majoré de colis MA-VL égal à 5 000 colis par an ou de colis HA égal à 600. Cette valeur du flux d'entrée

majoré est cohérente avec une durée cumulée de mise en stockage de 40 ans pour les colis MA-VL et de 70 ans pour les colis HA.

Le critère est égal au quotient de ce temps de remplissage de référence par le temps de construction. Plus la valeur du critère est élevée, plus le concept se prête à une variation rapide de flux. Une valeur inférieure à 1 signifie qu'un engorgement pourrait apparaître rapidement dans la filière, si le flux de colis en sortie de l'entreposage était interrompu.

Si la construction d'un module ne peut pas être menée en parallèle avec l'exploitation d'un autre, c'est le temps de construction de l'entreposage qui est considéré, car l'augmentation de capacité passerait dans ce cas, par sa duplication.

Par souci d'uniformisation la valeur du critère est arrondie à l'entier compris entre 0 et 5 le plus proche.

Critère 21 : La coexistence avec chantier

L'adaptabilité dépend également de la possibilité de mener simultanément l'exploitation d'un ou de plusieurs modules existants et la construction d'un nouveau module.

Ce critère est évalué en 6 niveaux suivant l'ampleur de la perturbation apportée au fonctionnement de l'installation existante par la construction d'une extension et suivant la facilité de la mise en exploitation commune de cette installation avec son extension.

Niveau 5 du critère : la construction de l'extension et la mise en exploitation commune peuvent être menées sans retirer les colis de l'installation existante et sans interrompre son exploitation.

Niveau 4 du critère : la construction de l'extension peut être menée sans retirer les colis de l'installation existante et sans interrompre son exploitation mais la mise en exploitation commune nécessite une interruption de l'exploitation qui dépasse un mois.

Niveau 3 du critère : la construction de l'extension et la mise en exploitation commune peuvent être menées sans retirer les colis de l'installation existante, mais l'exploitation doit être interrompue.

Niveau 2 du critère : la construction de l'extension et la mise en exploitation commune nécessite un retrait partiel des colis entreposés et une interruption de l'exploitation.

Niveau 1 du critère : la construction de l'extension et la mise en exploitation commune nécessite un retrait préalable de la totalité des colis entreposés.

Niveau 0 du critère : la mise en exploitation commune de l'entreposage et de son extension n'est pas possible. La capacité d'entreposage ne peut être étendue que par duplication, les installations fonctionnant ensuite de manière distincte.

Critère 22 : La mutualisation des équipements

L'adaptabilité dépend également de la possibilité de mutualiser des équipements qui une fois l'extension construite, pourront la desservir en même temps que l'installation initiale.

Ce critère est évalué en 6 niveaux suivant les simplifications qui peuvent être apportées à une extension de l'entreposage grâce à la mise en commun d'un certain nombre d'équipements qui peuvent être :

- l'interface d'entrée et de sortie,
- le système de manutention,
- le circuit de ventilation moyennant éventuellement un redimensionnement,
- les systèmes de surveillance des colis et des installations,
- la collecte et le traitement des eaux potentiellement contaminées...

Le niveau de performance, de 0 à 5, du critère est égal au nombre d'équipements qui peuvent être mutualisés. Si ce nombre est plus grand que 5, il est ramené à cette valeur.

Annexe 2

Résultats de l'analyse multicritère détaillée

Analyse multicritère des concepts novateurs d'entreposage de colis de déchets HA

	C1 Architecture en puits verticaux avec regroupement des colis	C2 Bâtiment multi- étagé	C3 Casemates modulaires en béton sur radier	H5 Entrepôt en puits verticaux construit à ciel ouvert, colis unitaires	H15 Entrepôt en galeries souterraines
Robustesse des fonctions de sûreté					
Confiner	2-4	2-4	2-3	2-3	2-3
Détecter le déconfinement	2-3	1-3	2-3	2-3	2-3
Protéger des rayonnements	2-4	2-4	0-4	2-3	2-4
Prévenir la criticité	3-5	2-4	2-5	2-4	2-4
Protéger des gaz radioactifs	2-4	2-4	1-2	2-3	2-4
Prévenir la chute	5	1	5	3	3
Prévenir les explosions	5	4	5	5	4
Prévenir les incendies	4	3	4	4	4
Prévenir les inondations	1-2	2-4	5	2	2
Secourir alimentations en énergie	4	1-3	5	2	0
Résister aux séismes	3	2	5	5	4
Parer la chute d'avion	1	0-1	3-4	4	4
Protéger des accidents indus.	2	2-3	4	3	4
Accessibilité des colis					
Examiner les colis en place	5	5	0	0	5
Prélever les colis	0	1	0	0	2
Polyvalence					
Gérer des colis différents	3-4	2-4	2-3	1	2-4
Gérer thermiques différentes	3	0-2	5	2-3	1-2
Gérer des flux variables	4-5	3-4	1-4	3-4	2-4
Aptitude à la durabilité					
Refroidir	2-3	2	4	2	1
Préserver de l'altération	2-4	1-4	2	1-4	1-4
Surveiller les entrepôts	3	2	3-4	2	2
Prolonger l'exploitation	2	4-5	1	4-5	4-5
Modularité					
Construire par modules	3	3	5	2	3
Coexistence avec c chantier	5	2-3	5	4	4
Mutualisation équipements	3-4	4	3-4	1-2	2-3

Analyse multicritère des concepts novateurs d'entreposage de colis de déchets MA-VL

Robustesse des fonctions de sûreté			
Confiner	3	3	3
Détecter le déconfinement	1	1	1
Protéger des rayonnements	0-4	0-4	0-4
Prévenir la criticité	0-3	1-4	2-4
Protéger des gaz radioactifs	1-3	1-3	2-4
Prévenir la chute	5	5	5
Prévenir les explosions	5	4	4
Prévenir les incendies	2-3	2-3	3-4
Prévenir les inondations	4	4	3
Secourir alimentations en énergie	2-3	2-3	2-3
Résister aux séismes	4	3	3
Parer la chute d'avion	1-2	1-2	4
Protéger des accidents indus.	3-4	3-4	5
Accessibilité des colis			
Examiner les colis en place	5	3	5
Prélever les colis	1	0	1
Polyvalence			
Gérer des colis différents	5	5	5
Gérer thermiques différentes	s.o.	s.o.	s.o.
Gérer des flux variables	5	5	5
Aptitude à la durabilité			
Refroidir	2	2	2
Préserver de l'altération	1-3	1-3	1-3
Surveiller les entrepôts	1-2	1-2	1-2
Prolonger l'exploitation	3-4	3-4	3-5
Modularité			
Construire par modules	4	4	4
Coexistence avec chantier	5	5	4
Mutualisation équipements	4-5	4-5	3-4



AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION
DES DÉCHETS RADIOACTIFS

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

www.andra.fr