RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ANDRA
Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

Décembre 2022

DOSSIER D'AUTORISATION DE CRÉATION DE L'INSTALLATION NUCLÉAIRE DE BASE (INB) CIGÉO

PIÈCE 7

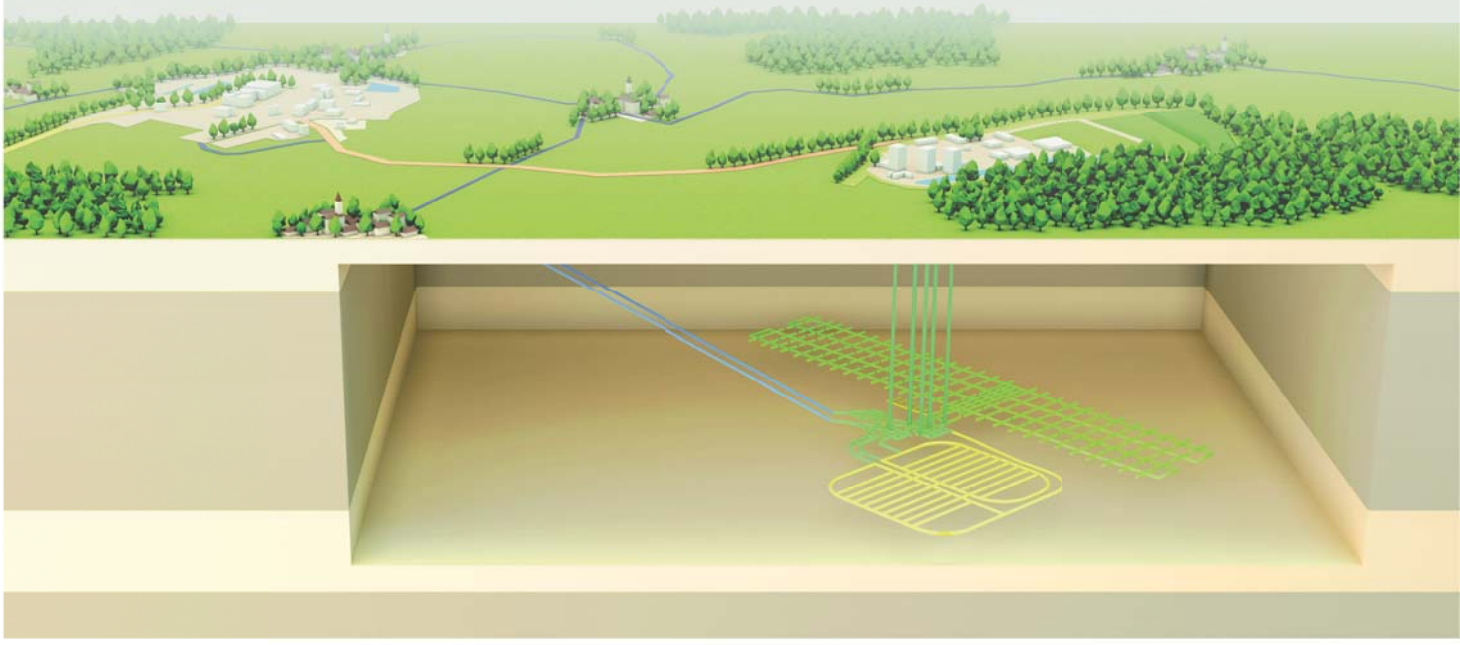
Version préliminaire du rapport de sûreté

PARTIE IV

Volumes complémentaires répondant au III de l'article R.593-16 du code de l'environnement

Volume 12

L'adaptabilité de l'INB à l'inventaire de réserve



Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo

Pièce 7 : Version préliminaire du rapport de sûreté
Partie IV : Volumes complémentaires répondant au III de l'article R.593-16 du code de l'environnement
Volume 12 : L'adaptabilité de l'INB à l'inventaire de réserve

CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-21-0007/A

Sommaire

1. Le contexte et le cadre réglementaire à l'égard de l'inventaire de réserve et de l'adaptabilité de l'INB 7

1.1 Les évolutions d'inventaires en colis de déchets radioactifs prises en compte pour le dossier de DAC 8

1.2 L'inventaire de réserve de l'INB Cigéo 8

1.3 L'objectif des études d'adaptabilité 9

2. Les colis de l'inventaire de réserve 11

2.1 La construction de l'inventaire de réserve 12

2.1.1 La démarche de construction de l'inventaire de réserve 12

2.1.2 La prise en compte des incertitudes liées à des évolutions de politique énergétique 12

2.1.3 La prise en compte des incertitudes liées à la mise en place de nouvelles filières de gestion de certains déchets radioactifs 16

2.2 La description des colis de l'inventaire de réserve 16

2.2.1 Les colis primaires 16

2.2.2 Les colis de stockage 24

2.2.3 Les inventaires en substances radioactives et toxiques chimiques des colis de déchets 30

2.2.4 Les grandeurs caractéristiques des colis de l'inventaire de réserve 40

3. La conception de l'INB associée au stockage des colis de l'inventaire de réserve 49

3.1 La démarche retenue pour vérifier que la conception de l'INB préserve la possibilité technique du stockage des colis de l'inventaire de réserve 50

3.2 L'identification des parties de l'INB concernées par l'adaptabilité 51

3.2.1 Les installations de surface 51

3.2.2 L'installation souterraine 54

3.3 Les dispositions pour la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve dans l'INB - cas du stockage des colis de déchets HA et MA-VL induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc (SR1) 57

3.4 Les dispositions pour la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve dans l'INB - cas du stockage des colis de combustibles usés (SNR enveloppe) 59

3.4.1 La gestion des colis de combustibles usés dans les installations de surface jusqu'à la mise en hotte de transfert 59

3.4.2 Le dimensionnement du gabarit de la hotte de transfert des combustibles usés et conséquences sur les ouvrages et les moyens de transfert des installations de surface vers l'installation souterraine 60

3.4.3 L'évolution de la conception des ouvrages de l'installation souterraine pour permettre la prise en charge des combustibles usés 64

3.5 La disposition pour la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve dans l'INB - cas du stockage des colis de déchets FA-VL 67

3.5.1 La gestion des colis de déchets FA-VL dans les installations de surface (bâtiments nucléaires EP1 et ET-H) 68

3.5.2 L'architecture de la zone de stockage MA-VL qui regrouperait le quartier de stockage MA-VL et le quartier de stockage FA-VL 69

4. La sûreté de l'INB vis-à-vis du stockage des colis de l'inventaire de réserve 73

4.1 Une démarche de sûreté analogue à celle menée pour les colis de l'inventaire de référence 74

4.2 Les spécificités du stockage des colis de l'inventaire de réserve vis-à-vis de la sûreté de l'INB 74

4.2.1 Les caractéristiques propres des colis de l'inventaire de réserve 75

4.2.2 Les dispositions conservatoires et/ou évolutions de la conception de l'INB liées au stockage des colis de l'inventaire de réserve 76

4.3 L'analyse préliminaire de sûreté 78

4.3.1 Pour la phase long terme après-fermeture 78

4.3.2 Pour la phase de fonctionnement 98

5. Conclusion sur l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve 105

Annexes 109

Annexe 1 Tableau des catégories physico-chimiques des familles de colis FA VL 110

Tables des illustrations 113

Références bibliographiques 115

Préambule

L'article L. 542-10-1 du code de l'environnement, modifié par la loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue (1), impose que le centre de stockage en couche géologique profonde soit réversible. Le caractère « réversible » d'un centre de stockage y est défini comme suit : *« La réversibilité est la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion. »*.

« La réversibilité est mise en œuvre par la progressivité de la construction, l'adaptabilité de la conception et la flexibilité d'exploitation d'un stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs permettant d'intégrer le progrès technologique et de s'adapter aux évolutions possibles de l'inventaire des déchets consécutives notamment à une évolution de la politique énergétique. Elle inclut la possibilité de récupérer des colis de déchets déjà stockés selon des modalités et pendant une durée cohérente avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du stockage.

Le caractère réversible d'un stockage en couche géologique profonde doit être assuré dans le respect de la protection des intérêts mentionnés à l'article L. 593-1 [du code de l'environnement] »

L'adaptabilité développée dans le présent volume constitue l'un des quatre volets de la réversibilité définie par le code de l'environnement.

Par ailleurs, l'article D. 542-90 du code de l'environnement dispose que *« le centre de stockage est conçu pour accueillir les déchets de l'inventaire de référence »* mais qu'il *« est également conçu* [...] *pour être en mesure d'accueillir les substances qui figurent à* [l']*inventaire* [de réserve], *sous réserve le cas échéant d'évolutions dans sa conception pouvant être mises en œuvre en cours d'exploitation à un coût économiquement acceptable. »*. L'adaptabilité consiste ainsi à couvrir les incertitudes sur les inventaires en nombre et typologies de colis *« liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou à des évolutions de politique énergétique »* par la vérification de la faisabilité du stockage des colis de l'inventaire de réserve et par l'identification d'évolutions dans sa conception et/ou de dispositions conservatoires à mettre en place dès sa construction initiale.

Dans son avis n° 2018-AV-0300 du 11 janvier 2018 (2) relatif au dossier d'options de sûreté pour le projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde, l'ASN demande à l'Andra de *« justifier qu'il n'y a pas d'élément rédhibitoire au stockage des déchets de cet inventaire de réserve »*. En complément, l'Autorité demande, dans l'annexe C à sa lettre du 12 janvier 2018 (3) précisant les options de sûreté satisfaisantes ainsi que les études et justifications complémentaires nécessaires à la demande d'autorisation de création, que soient jointes *« au dossier de demande d'autorisation de création » « des études sur l'inventaire de réserve »* qui *« devraient permettre d'avoir la raisonnable assurance que la démonstration de sûreté pourra, le cas échéant, être confirmée pour les déchets de l'inventaire de réserve. »* Cette demande est complétée par l'article R. 593-16° du code de l'environnement qui dispose que la version préliminaire du rapport de sûreté « *décrit et justifie les dispositions prévues pour assurer le caractère réversible du stockage ainsi que le prescrit l'article L. 542-10-1* » et par conséquent, son caractère adaptable. Le présent volume démontre ainsi l'adaptabilité de l'INB Cigéo au moyen d'études préliminaires de conception et de sûreté conduites au stade d'esquisse et identifie les dispositions nécessaires pour permettre cette adaptabilité.

Le contexte et le cadre réglementaire associé à l'adaptabilité sont rappelés au chapitre 1 du présent volume. Les colis de l'inventaire de réserve sont ensuite présentés au chapitre 2 du présent volume. Puis les éléments qui permettent de *« justifier qu'il n'y a pas d'élément rédhibitoire au stockage des déchets de cet inventaire de réserve »* au regard de l'adaptation de la conception et de la sûreté en fonctionnement et à long terme de l'INB sont respectivement restitués au chapitre 3 et au chapitre 4 du présent volume. Le chapitre 5 conclut quant à la faisabilité de l'adaptabilité au stockage des colis de l'inventaire de réserve.

1

Le contexte et le cadre réglementaire à l'égard de l'inventaire de réserve et de l'adaptabilité de l'INB

1.1 Les évolutions d'inventaires en colis de déchets radioactifs prises en compte pour le dossier de DAC 8
1.2 L'inventaire de réserve de l'INB Cigéo 8
1.3 L'objectif des études d'adaptabilité 9

1.1 Les évolutions d'inventaires en colis de déchets radioactifs prises en compte pour le dossier de DAC

Concomitamment à la promulgation de la loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 présentée en préambule de ce volume qui précise les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue (1), l'ASN définit dans la lettre CODEP-DRC-2016-005220 du 20 juin 2016 (4) l'exigence d'adaptabilité, constitutive du *« principe de réversibilité »*, comme *« devant permettre de prendre en compte d'éventuels changements dans le scénario d'exploitation* [du centre de stockage Cigéo] *tel qu'envisagé du fait d'évolutions en termes de politique énergétique ou de choix industriels (conduisant par exemple au stockage direct de combustibles usés ou de déchets de faible activité à vie longue qui ne pourraient être stockés à faible profondeur) »*.

Dans l'annexe C relative aux *« Études et justifications complémentaires nécessaires pour une demande d'autorisation de création »* de la lettre ASN du 12 janvier 2018 relative au dossier d'options de sûreté pour le projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde (3) transmise à la suite de l'instruction du Dossier d'options de sûreté (DOS) de l'INB , l'ASN demande que *« des études sur l'inventaire de réserve soient jointes au dossier de demande d'autorisation de création »* de l'INB Cigéo déposé par l'Andra.

Dans le cadre du dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de l'INB Cigéo établi par l'Andra, le présent volume permet de répondre à l'ensemble des demandes législatives et réglementaires précitées qui imposent d'étudier les conséquences sur le développement du centre de stockage Cigéo d'éventuelles évolutions de *« politique énergétique »* et de *« solutions de gestion »* de ces déchets.

Cela se traduit par l'étude du stockage de colis dont le type et la quantité diffèrent de ceux retenus pour la conception actuelle de l'INB. Une définition de cet inventaire dit *« de réserve »* a été proposée en 2019 dans le cadre du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) 2016-2018 (5). À l'issue, l'ASN dans son avis n° 2020-AV-0369 du 1er décembre 2020 (6) estime *« satisfaisant que la mise à jour de l'inventaire de réserve, proposée par l'Andra, intègre désormais l'ensemble des combustibles usés du CEA (civils et défense), des déchets des petits producteurs et du nucléaire diffus et des empilements de graphite »*.

Lorsque nécessaire, des hypothèses de conditionnement des déchets ont été retenues conjointement avec les producteurs de déchets.

1.2 L'inventaire de réserve de l'INB Cigéo

L'article D. 542-90 du code de l'environnement dispose que *« l'inventaire à retenir par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs pour les études et recherches conduites en vue de concevoir le centre de stockage prévu à l'article L. 542-10-1 comprend un inventaire de référence et un inventaire de réserve. »* et que *« l'inventaire de réserve prend en compte les incertitudes liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou à des évolutions de politique énergétique. »*.

À l'article D. 542-91 du même code, il est précisé que *« s'ils ne figurent pas dans l'inventaire de référence, les combustibles usés issus de l'exploitation des réacteurs électronucléaires, des réacteurs expérimentaux et de la propulsion nucléaire navale sont intégrés dans l'inventaire de réserve. »*.

L'article 40 de l'arrêté du 23 février 2017 pris en application du décret n° 2017-231 (7), ajoute que seront intégrés *« à titre conservatoire certains déchets FA-VL dans [...] les réserves (les déchets de graphite [chemises], les déchets d'enrobés bitumineux FA-VL [non traités] et les déchets UNGG de la Hague) de l'inventaire de Cigéo. »*.

Enfin, dans l'avis n° 2018-AV-0300 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 11 janvier 2018 relatif au dossier d'options de sûreté présenté par l'Andra pour le projet global Cigéo de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde (2), l'ASN précise le contenu de l'inventaire de réserve de la manière suivante : *« [...] cet inventaire devrait prendre en compte l'ensemble des stratégies industrielles aujourd'hui envisagées par les producteurs, en particulier pour ce qui concerne la durée de fonctionnement des réacteurs et leur puissance ainsi que la gestion des combustibles usés du CEA en intégrant les déchets résultant du traitement de ces combustibles et, s'il y a lieu, les combustibles qui ne seraient pas retraités. ».*

En réponse à l'article 56 de l'arrêté du 23 février 2017 (7) qui prescrit que *« L'ANDRA remet au ministre chargé de l'énergie avant le 31 mars 2017 une proposition de types et de quantités de déchets à inclure dans l'inventaire de réserve de Cigéo »*, l'inventaire de réserve de Cigéo est décrit dans le document « Inventaire de réserve de l'INB Cigéo » (8).

Ainsi, l'inventaire de réserve retenu pour les études d'adaptabilité du présent rapport est constitué :

- de déchets HA vitrifiés et de déchets MA-VL de structure compactés et technologiques correspondant à l'allongement de la durée de fonctionnement du parc électronucléaire de 10 ans environ ;
- de combustibles usés non retraités issus des réacteurs électronucléaires, de la recherche et de la propulsion navale ;
- de certains déchets FA-VL au titre des incertitudes liées notamment à la mise en place de filières de gestion de ces déchets.

» TERMINOLOGIE RETENUE POUR DÉSIGNER LES COMBUSTIBLES NON RETRAITÉS ET STOCKÉS EN L'ÉTAT

Le terme « combustible usé » concerne aussi bien les combustibles irradiés que les combustibles non irradiés ou faiblement irradiés. Principalement employé dans la littérature, il désigne tous les combustibles qui ne peuvent plus être utilisés en l'état. Il couvre ainsi les combustibles plus ou moins irradiés issus des réacteurs électronucléaires civils et militaires et les combustibles issus des réacteurs expérimentaux dont la géométrie est intègre ou non.

Ainsi le terme « combustible usé » ou « CU » désigne tout combustible qui n'est pas retraité. Ce terme est retenu dans la suite du présent volume.

1.3 L'objectif des études d'adaptabilité

Dans l'avis n° 2018-AV-0300 du 11 janvier 2018 (2), l'ASN présente les objectifs des études à mener pour la prise en charge de l'inventaire de réserve, qualifiées d'« études d'adaptabilité », de la manière suivante : *« Au stade de la demande d'autorisation de création de l'installation, l'Andra doit présenter l'inventaire de réserve retenu, conformément à l'avis de l'ASN du 31 mai 2016 susvisé, et justifier qu'il n'y a pas d'élément rédhibitoire au stockage des déchets de cet inventaire de réserve. ».*

À cela s'ajoute l'annexe C à la lettre ASN du 12 janvier 2018 (3) dans laquelle l'ASN *« demande, conformément au PNGMDR 2016-2018, que des études sur l'inventaire de réserve soient jointes au dossier de demande d'autorisation de création et qu'elles intègrent :*

- *une esquisse des concepts retenus pour l'éventuel stockage des déchets de cet inventaire ;*
- *la démonstration que la conception retenue pour l'installation de stockage dont la création est prévue préserve la possibilité technique de l'accueil des déchets de cet inventaire ;*
- *des éléments présentant les modifications éventuelles à apporter aux installations « support » (descenderies, galeries d'accès, installations de surface, ventilation...) et de leur impact potentiel sur la démonstration de sûreté de l'installation ;*

- *les jalons d'un programme R&D qui permettrait de disposer, en temps voulu, de la démonstration complète de la sûreté de leur stockage.*

Ces études devraient permettre d'avoir la raisonnable assurance que la démonstration de sûreté pourra, le cas échéant, être confirmée pour les déchets de l'inventaire de réserve. Les éléments pertinents sont à verser à la version préliminaire du rapport de sûreté. ».

Conformément à la démarche retenue pour mener les études d'adaptabilité présentées en 2019 dans le cadre du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) 2016-2018 (9, 10), les études d'adaptabilité ont pour objectif, d'une part, d'évaluer la faisabilité technique de la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve dans l'INB Cigéo et d'identifier, le cas échéant les évolutions éventuelles de l'installation par rapport à la conception actuelle prévue pour le stockage des colis de déchets radioactifs de l'inventaire de référence. Parmi les évolutions éventuelles sont identifiées en priorité les dispositions conservatoires à mettre en place dès la construction initiale.

D'autre part, ces études ont pour objectif de montrer que les évolutions éventuelles de la conception, ainsi que les travaux prévus pour les mettre en œuvre en temps voulu et la mise en stockage des colis de l'inventaire de réserve ne remettent pas en cause la sûreté du stockage. Ainsi, ces éléments inhérents aux études de sûreté d'adaptabilité visent à vérifier la « *faisabilité d'une démonstration de sûreté* » en considérant les colis de l'inventaire de réserve et la justification de la capacité de l'Andra à apporter ultérieurement les compléments de démonstration de sûreté spécifiques à la prise en charge de ces colis.

Les études d'adaptabilité permettent ainsi de vérifier que la conception actuelle de l'INB Cigéo ne présente pas de caractère rédhibitoire au stockage des colis de l'inventaire de réserve.

2

Les colis de l'inventaire de réserve

2.1 La construction de l'inventaire de réserve 12
2.2 La description des colis de l'inventaire de réserve 16

2.1 La construction de l'inventaire de réserve

2.1.1 La démarche de construction de l'inventaire de réserve

L'inventaire de réserve introduit par le code de l'environnement (8), permet de tenir compte des évolutions possibles entre l'inventaire de référence[1] retenu pour les études de conception et de sûreté de l'INB Cigéo (cf. Description au chapitre 1.1 du volume 3 du présent rapport) et celui des déchets qui y seront réellement stockés. Cet inventaire est ainsi composé de colis dont le type et la quantité permettent de couvrir « *les incertitudes liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou à des évolutions de politique énergétique* » (article D.542-90 du code de l'environnement). La démarche de construction retenue[2] repose sur la prise en compte des inventaires enveloppes des déchets générés dans chacun des scénarios de politique énergétique établis au sein de l'Inventaire national (cf. Chapitre 2.1.2 du présent volume) ainsi que de l'inventaire des déchets FA-VL pour lesquels la filière de gestion présente des incertitudes à ce stade (cf. Chapitre 2.1.3 du présent volume).

2.1.2 La prise en compte des incertitudes liées à des évolutions de politique énergétique

Les types et les quantités de colis à intégrer dans l'inventaire de réserve au titre des évolutions possibles de politique énergétique ont été estimés à partir des scénarios de politique énergétique définis dans l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs comme pour la construction de l'inventaire de référence. Ainsi, l'édition 2018 de l'Inventaire national (12) établit « *quatre scénarios contrastés d'évolution de la politique énergétique actuelle : trois scénarios de renouvellement du parc électronucléaire français actuel et un scénario de non-renouvellement.* » conformément aux demandes du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs 2016-2018 (13) :

- le scénario SR1 « *prend pour hypothèses la poursuite de la production d'électricité d'origine nucléaire avec le déploiement de réacteurs EPR puis RNR*[3] *et la poursuite du retraitement des combustibles usés (maintien de la stratégie actuelle)* » en considérant « *une durée de fonctionnement des réacteurs du parc électronucléaire actuel comprise entre 50 et 60 ans* » ;
- le scénario SR2 « *comme le scénario SR1, repose sur la poursuite de la production d'électricité d'origine nucléaire avec le déploiement de réacteurs EPR puis RNR et le maintien de la stratégie actuelle en matière de retraitement de combustibles usés* » mais en considérant « *une durée de fonctionnement uniforme de 50 ans de l'ensemble des réacteurs* » ;
- le scénario SR3 « *repose sur la poursuite de la production d'électricité d'origine nucléaire avec le déploiement de réacteurs EPR uniquement* » en considérant « *une durée de fonctionnement des réacteurs du parc électronucléaire actuel comprise entre 50 et 60 ans* » ;
- le scénario SNR (Scénario de non-renouvellement) « *suppose le non-renouvellement du parc existant, entraînant l'arrêt immédiat du nucléaire* » et « *une durée de fonctionnement des 58 réacteurs REP*[4] *de 40 ans et de 60 ans pour l'EPR de Flamanville* ».

Le scénario permettant d'établir l'inventaire de référence (14) à l'instar de la politique énergétique actuelle est le scénario SR2 de l'édition 2018 de l'Inventaire national (12), qui reprend les hypothèses et données du scénario des industriels de l'édition 2015 de l'Inventaire national (15).

---

1 L'inventaire de référence correspond aux prévisions de production de déchets HA et MA-VL telles qu'envisagées par les producteurs lors du lancement des études de conception en 2011 et déclarées depuis cette date à l'Inventaire national.
2 Cette démarche est développée dans le document « Démarche d'élaboration des inventaires de l'INB Cigéo » (11).
3 Réacteur à neutrons rapides.
4 Réacteur à eau pressurisée.

Les trois autres scénarios considérant des évolutions différentes de politique énergétique, comme l'allongement de la durée de fonctionnement du parc ou l'arrêt du retraitement des combustibles usés, servent alors de base à la détermination des types et quantités de substances à intégrer dans l'inventaire de réserve. Dans un souci de conservatisme, seuls les scénarios qui maximisent le nombre de colis, en cas de renouvellement du parc et en cas de non-renouvellement, sont retenus.

Dans l'hypothèse du renouvellement du parc électronucléaire français, le scénario SR1 est le scénario de l'édition 2018 de l'Inventaire national (12) qui génère le plus grand nombre de colis de déchets HA et MA-VL en raison de la prise en compte de l'allongement de la durée de fonctionnement du parc de 10 années supplémentaires environ et de l'hypothèse de retraitement de l'ensemble des combustibles usés, contrairement au scénario SR3.

Le scénario SR1 conduit à intégrer dans l'inventaire de réserve les colis de déchets HA vitrifiés et les colis de déchets de structure MA-VL qui correspondent au retraitement de tous les combustibles usés induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc. Les typologies de colis de déchets associés à ce scénario sont présentées succinctement dans le tableau 2-1 et les colis de ce scénario inclus dans l'inventaire de réserve sont décrits plus spécifiquement au chapitre 2.2.1.1 du présent volume.

Tableau 2-1 *Typologies de colis de déchets HA et MA-VL associés au scénario SR1 de l'édition 2018 de l'Inventaire national*

Inventaire associé aux colis considérés pour le scénario SR1	Typologies de colis de déchets HA	Typologies de colis de déchets MA-VL
Colis de l'inventaire de référence	• colis de déchets HA vitrifiés issus du retraitement de tous les CU (UNE[5], URE[6], MOX, EL4, RNR et métalliques) générés pendant une période fonctionnement des réacteurs de 50 ans (60 ans pour l'EPR de Flamanville).	• colis de déchets de structure issus du retraitement de tous les CU (UNE, URE, MOX, EL4, RNR et métalliques) générés pendant une période fonctionnement des réacteurs de 50 ans (60 ans pour l'EPR de Flamanville).
Colis inclus dans l'inventaire de réserve	• colis de déchets HA vitrifiés issus du retraitement des CU (UNE, URE, MOX, EL4, RNR et métalliques) induits par l'allongement de la durée de fonctionnement des réacteurs d'environ 10 ans.	• colis de déchets de structure issus du retraitement des CU (UNE, URE, MOX, EL4, RNR et métalliques) induits par l'allongement de la durée de fonctionnement des réacteurs d'environ 10 ans.

L'augmentation du nombre de colis de déchets HA et MA-VL par rapport au nombre de colis retenus dans l'inventaire de référence (respectivement de 17 % et de 0,1 %), induite par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc de dix années supplémentaires environ selon le scénario SR1 de l'édition 2018 de l'Inventaire national, est représentée par la figure 2-1.

[5] Combustible à l'uranium naturel enrichi.
[6] Combustible à l'uranium de retraitement enrichi.

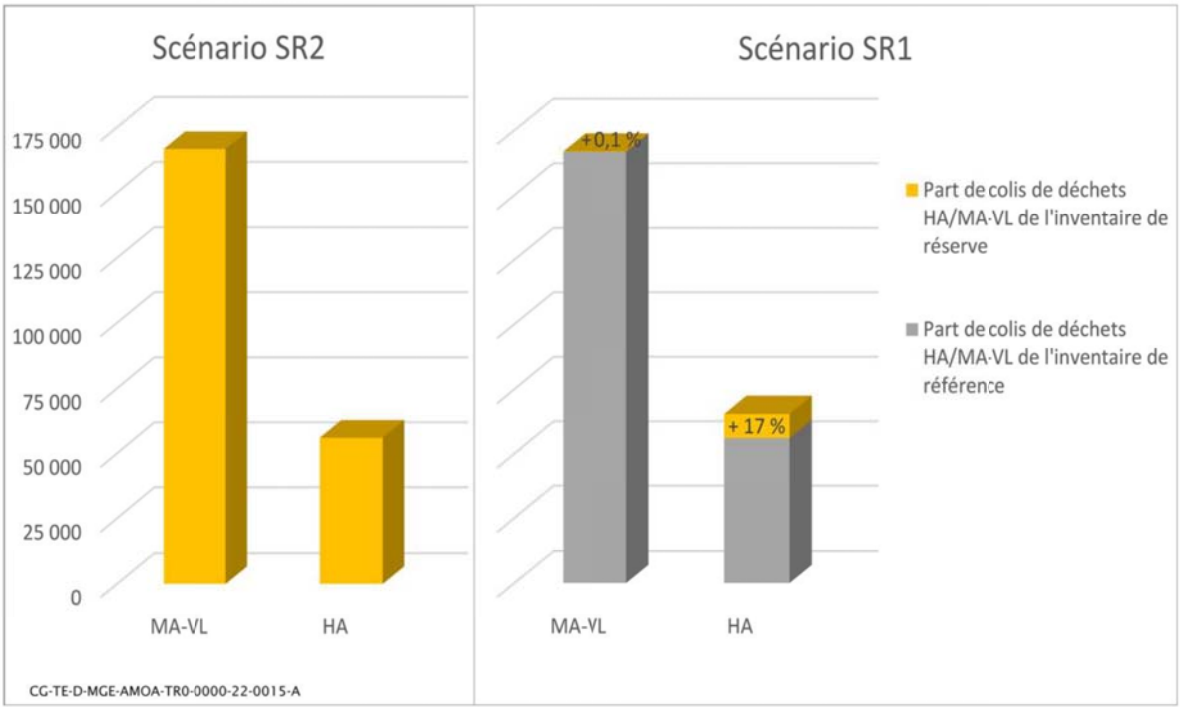


Figure 2-1 *Comparaison du nombre de colis de déchets HA et MA-VL entre le scénario SR2 et le scénario SR1*

Dans l'hypothèse du non-renouvellement du parc électronucléaire français, induisant l'arrêt du retraitement de tous les combustibles usés, le scénario retenu pour l'inventaire de réserve est une variante du scénario de non-renouvellement (scénario SNR) retenu dans l'édition 2018 de l'Inventaire national (12). Il se distingue de ce dernier par la durée de fonctionnement des réacteurs retenue : 40 ans pour les 58 réacteurs du parc actuel et 60 ans pour l'EPR de Flamanville dans le SNR défini dans l'édition 2018 de l'Inventaire national et entre 50 ans et 60 ans de fonctionnement pour les 59 réacteurs dans le scénario de non-renouvellement pris en compte dans l'inventaire de réserve. Cette variante répond au besoin de considérer un inventaire de combustibles usés enveloppe.

De plus, l'inventaire de réserve intègre également le stockage des combustibles usés du CEA. Afin de couvrir les incertitudes liées à la faisabilité de leur retraitement, les combustibles expérimentaux civils et de propulsion nucléaire sont étudiés dans le cadre de l'adaptabilité de l'INB Cigéo.

Ceci conduit à intégrer dans l'inventaire de réserve tous les combustibles usés non encore retraités qui sont alors stockés en l'état. Les typologies de colis associés à ce scénario sont présentées succinctement dans le tableau 2-2 et les colis retenus pour ce scénario inclus dans l'inventaire de réserve sont décrits plus spécifiquement au chapitre 2.2 du présent volume.

Tableau 2-2 *Typologies de colis de déchets HA et MA-VL et de colis de combustibles usés associés au scénario SNR enveloppe, variante du scénario SNR de l'édition 2018 de l'Inventaire national.*

Inventaire associé aux colis considérés pour le scénario SNR enveloppe	Typologies de colis de déchets HA et/ou de colis CU	Typologies de colis de déchets MA-VL
Colis de l'inventaire de référence	• colis de déchets HA vitrifiés correspondant uniquement au retraitement d'une partie des combustibles usés UNE, dont le nombre est ainsi diminué par rapport à l'inventaire de référence.	• colis de déchets de structure, dont le nombre est diminué par rapport à l'inventaire de référence (retraitement d'une partie des combustibles usés UNE uniquement).
Colis inclus dans l'inventaire de réserve	• colis de combustibles usés à base d'oxyde d'uranium des réacteurs électronucléaires EDF (UNE et URE) et EL4 ; • colis de combustibles usés à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium des réacteurs électronucléaires EDF (MOX et RNR) ; • colis de combustibles usés à base d'oxyde d'uranium, d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium ou combustibles usés métalliques, provenant des réacteurs expérimentaux et de la propulsion navale du CEA (UOx, MOX, RNR et métalliques).	/

En raison de l'arrêt du retraitement des combustibles usés, un nombre plus faible de colis de déchets HA et MA-VL à stocker est considéré. La part de ces colis de déchets à retirer de l'inventaire de référence (34 % pour les colis de déchets HA et 15 % pour de déchets MA-VL) ainsi que le nombre de colis de combustibles usés à considérer pour le stockage selon le scénario SNR enveloppe sont représentés par la figure 2-2.

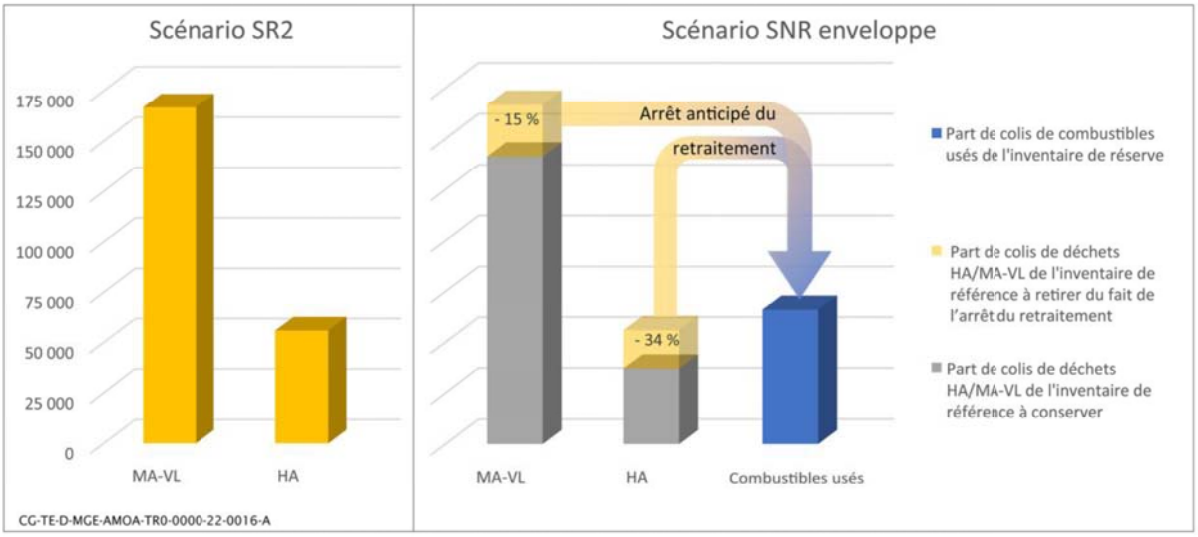


Figure 2-2 *Comparaison du nombre de colis de déchets HA, MA-VL et de colis de combustibles usés entre le scénario SR2 et le scénario SNR enveloppe*

2.1.3 La prise en compte des incertitudes liées à la mise en place de nouvelles filières de gestion de certains déchets radioactifs

Les incertitudes liées à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets portent principalement sur la capacité à développer une installation de stockage capable de prendre en charge tout ou partie des déchets aujourd'hui affectés au stockage des colis de déchets de faible activité à vie longue (FA-VL).

Par conséquent, en conformité avec l'article 40 de l'arrêté du 23 février 2017 (7), certains déchets considérés comme relevant de la catégorie FA-VL sont intégrés dans l'inventaire de réserve de l'INB Cigéo à titre de précaution (8, 11). Les typologies de colis associés à cette réorientation du mode de gestion sont présentées succinctement dans le tableau 2-3 et les caractéristiques de ces colis sont décrites plus spécifiquement au chapitre 2.2.1.3 du présent volume.

Tableau 2-3 *Typologies de colis de déchets FA-VL associés à la réorientation du mode de gestion des déchets FA-VL*

Inventaire associé aux colis considérés pour la prise en compte d'une modification de la filière de gestion de FA-VL	Typologies de colis de déchets FA-VL
Colis de l'inventaire de référence	Sans objet
Colis inclus dans l'inventaire de réserve	• colis de chemises et empilements de graphites ; • colis de déchets « UNGG de La Hague » ; • colis de déchets bitumés de type FA-VL ; • colis de déchets des petits producteurs et du nucléaire diffus collectés par l'Andra.

2.2 La description des colis de l'inventaire de réserve

2.2.1 Les colis primaires

2.2.1.1 Les colis de déchets HA et MA-VL induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc

L'allongement de la durée de fonctionnement du parc postulé par le scénario SR1 de l'édition 2018 de l'Inventaire national conduit à une production supplémentaire de l'ensemble des combustibles usés à base d'oxyde d'uranium (uranium oxyde ou UOX) de type UNE ou URE en provenance des réacteurs de type REP et des combustibles usés à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (*mixed oxide* ou MOX) en provenance des réacteurs de type REP ou RNR.

Leur retraitement produit des déchets de type HA et de type MA-VL qui correspondent à :

- des déchets vitrifiés de type HA conditionnés dans des conteneurs standards de déchets vitrifiés (CSD-V) ;
- des déchets technologiques de type MA-VL conditionnés dans des conteneurs standards de déchets compactés (CSD-C) ;
- des déchets d'exploitation de type MA-VL conditionnés dans des conteneurs de type béton (C1PG^{SP}) ou béton-fibre (CBF-C'2).

L'allongement de la durée de fonctionnement du parc induit la production d'un peu moins de 10 000 colis de déchets vitrifiés de type CSD-V UNE/URE/MOX supplémentaires dont les caractéristiques sont considérées identiques à celles des colis de déchets vitrifiés HA (COG-800 et COG-200) de l'inventaire de référence (cf. Chapitre 1.2 du volume 3 du présent rapport) :

- la famille COG-800 regroupe les colis de verres UOX produits suivant la spécification 300 AQ 060 ;
- la famille COG-200 regroupe les colis de verres UOX/URE/MOX dont la productior n'a pas démarré.

En ce qui concerne les déchets de structure de type CSD-C, le ratio de production de ces colis par tonne de métal lourd a été réévalué à la baisse dans le cadre de l'évaluation des quantitatifs du scénario SR1 de l'édition 2018 de l'Inventaire national. Cette réévaluation compense l'effet de l'augmentation de la durée du retraitement induite par le prolongement au-delà de 50 ans de l'exploitation du parc. L'inventaire de réserve ne comporte donc pas de CSD-C supplémentaire.

Pour les déchets d'exploitation d'EDF, il est considéré un prolongement de la production actuelle, soit environ une centaine de colis C1PG^{SP} supplémentaires (de DAE REP) dont les caractéristiques sont identiques à celles des colis (famille EDF-080) de l'inventaire de référence (cf. Chapitre 1.3 du volume 3 du présent rapport).

S'agissant des déchets d'exploitation d'Orano, dans le cadre de l'élaboration de l'édition 2018 de l'Inventaire national (12), Orano a déclaré une diminution dans les années à venir de la production des colis CBF-C'2 (COG-030) en lien avec son objectif industriel. L'effet de l'augmentation de la durée de fonctionnement des réacteurs est compensé par cette diminution de production des colis CBF-C'2. Ainsi, de même que pour les colis de type CSD-C, il est retenu de ne pas considérer de colis CBF-C'2 supplémentaires à prendre en compte dans l'inventaire de réserve.

Colis primaires de déchets de type HA et MA-VL pris en compte dans l'inventaire de réserve

Le nombre et la typologie de colis primaires de déchets de type HA et MA-VL induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc considérés dans l'inventaire de réserve correspond à :

- pour les colis de déchets HA, 10 000 colis de déchets vitrifiés de type CSD-V répartis entre les familles COG-800 (colis de verres UOX) et COG-200 (colis de verres UOX/URE/MOX). Ils constituent une augmentation d'environ 17 % du nombre de colis primaires HA à considérer pour le stockage par rapport à ce qui est pris en compte dans l'inventaire de référence ;
- pour les colis de déchets MA-VL, 120 colis C1PG^{SP} de la famille EDF-080. Ils constituent une très faible augmentation (de l'ordre de 0,1 %) du nombre de colis primaire MA-VL à considérer pour le stockage par rapport à ce qui est pris en compte dans l'inventaire de référence.

2.2.1.2 Les colis de combustibles usés

Le scénario de non-renouvellement SNR enveloppe postule l'arrêt anticipé du retraitement de l'ensemble des combustibles usés ainsi que l'allongement de la durée de vie du parc. Les combustibles usés de type UNE résiduels non retraités au terme de la durée de fonctionnement des réacteurs, les combustibles usés de type URE et MOX, les combustibles issus des réacteurs prototypes aujourd'hui arrêtés (réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium Superphénix et réacteur à eau lourde EL4 de Brennilis), actuellement non retraités ainsi que l'ensemble des combustibles usés du CEA (divers réacteurs expérimentaux ou d'expertises menées par le CEA civil, ainsi que des chaufferies embarquées et à terre de la propulsion nucléaire navale) sont alors considérés comme des déchets et supposés stockés en l'état.

Colis de combustibles usés pris en compte dans l'inventaire de réserve

Le scénario SNR enveloppe conduit au stockage de combustibles usés correspondant à :

- un peu plus de 60 000 combustibles UNE, URE, MOX et RNR issus de l'exploitation des réacteurs électronucléaires EDF (REP, RNR et EL4[7]) ;
- des combustibles UOX, MOX, RNR et métalliques du CEA se distinguant selon leur utilisation dans les réacteurs expérimentaux ou dans le secteur de la propulsion nucléaire navale.

La figure 2-3 représente la répartition du nombre de colis primaires en fonction des typologies de combustibles usés de l'inventaire de réserve.

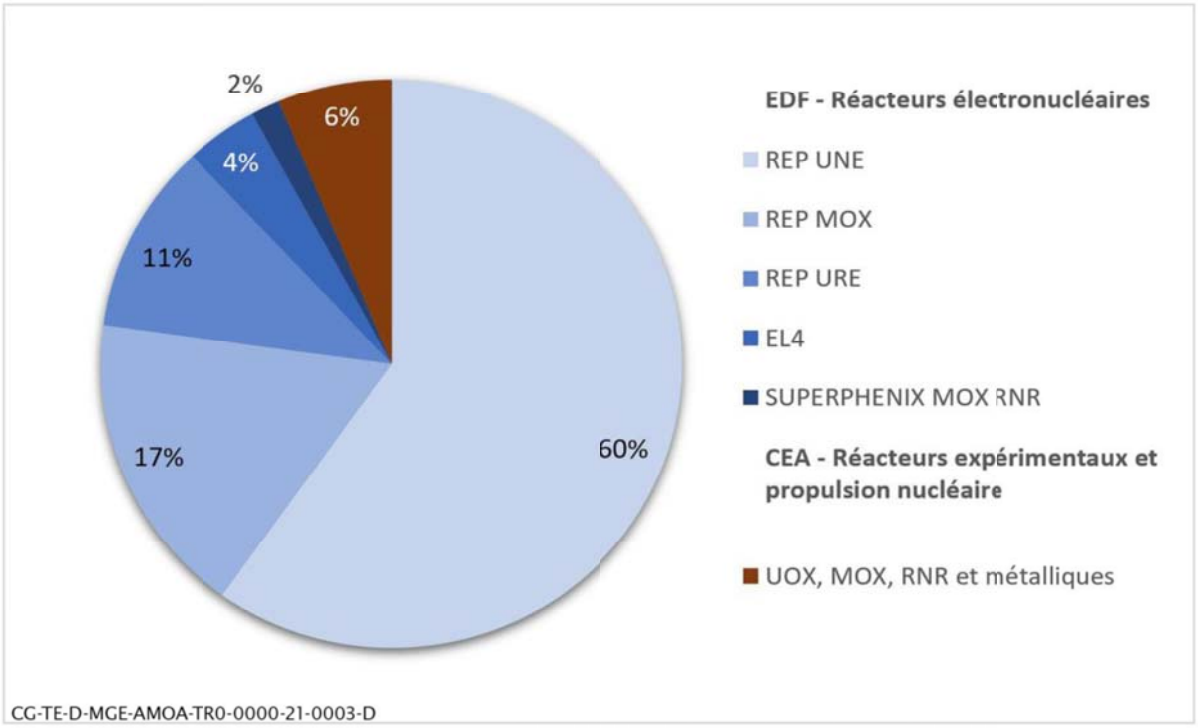


Figure 2-3 *Répartition du nombre de colis primaires selon les typologies de combustibles usés*

Ces combustibles usés répartis en 30 familles sont décrits succinctement dans les paragraphes suivants. Certains combustibles usés, essentiellement en provenance du CEA, ont déjà fait l'objet d'un conditionnement et sont actuellement entreposés dans des installations spécifiques d'entreposage à sec.

[7] Réacteur à eau lourde n° 4.

2.2.1.2.1 Les combustibles UNE, URE, MOX et RNR issus de l'exploitation des réacteurs électronucléaires EDF (REP, RNR et EL4)

Les combustibles de type REP sont issus des 59 réacteurs REP du parc électronucléaire français qui disposent d'un décret d'autorisation de création à la date de fin 2016. Cela comprend les 58 réacteurs en fonctionnement au démarrage des études d'avant-projet[8] (34 réacteurs de 900 MWe, 20 réacteurs de 1 300 MWe et quatre réacteurs de 1 450 MWe), et mis en service entre 1977 et 1999, et le réacteur EPR (Flamanville 3) de 1 650 MWe. Ces combustibles appartiennent à trois grandes typologies :

- les combustibles de type UNE (familles EDF-2000, EDF-2010 et EDF-2040) qui sont des combustibles à base d'oxyde d'uranium naturel enrichi en ^{235}U dans une gaine en alliage de zirconium ;
- les combustibles de type URE (familles EDF-2020, EDF-2030 et EDF-2050) qui sont des combustibles à base d'oxyde d'uranium de retraitement ré-enrichi en ^{235}U dans une gaine en alliage de zirconium. Ils permettent de recycler l'uranium issu du retraitement des combustibles UNE ;
- les combustibles de type MOX (familles EDF-2100, EDF-2110, EDF-2120 et EDF-2130) qui sont des combustibles à base d'oxyde mixte uranium-plutonium dans une gaine en alliage de zirconium. Ils permettent de recycler le plutonium issu du retraitement des combustibles UNE.

Ces typologies présentent différents taux de combustion, différents enrichissements en ^{235}U pour les combustibles UNE et URE et différentes teneurs en plutonium pour les combustibles MOX. Les combustibles UNE et URE peuvent être sous la forme d'assemblages courts ou d'assemblages longs selon leur provenance tandis que les combustibles MOX sont tous sous la forme d'assemblages courts. Il est envisagé à ce stade que tous ces combustibles soient conditionnés dans quatre types de conteneurs métalliques, répartis selon les catégories court ou long et CP-E ou CP-I[9], selon l'assemblage conditionné.

Les combustibles dénommés RNR MOX-SPX (familles EDF-2200, EDF-2210, EDF-2220, EDF-2230) proviennent du réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium SUPERPHENIX. Ce sont des combustibles de type oxyde mixte uranium-plutonium dont la gaine est en acier inoxydable. Les assemblages peuvent être neufs ou irradiés et composés d'aiguilles fissiles ou fertiles. Il est prévu que ces combustibles soient conditionnés unitairement en conteneurs métalliques appelés SPX.

Les combustibles EL4 (famille EDF-2300) sont issus du réacteur de la filière à eau lourde portant le même nom et situé sur le site de Brennilis. Il s'agit de combustibles à base d'oxyde d'uranium faiblement enrichi inséré dans une gaine métallique en alliage de zirconium-cuivre. Ces combustibles sont principalement conditionnés en conteneurs en acier inoxydable appelés AA281, tandis qu'une faible part est conditionnée (ou le sera) en étuis regroupés par lot dans des conteneurs C1 ou C2 en acier inoxydable.

2.2.1.2.2 Les combustibles UOX, MOX, RNR et métalliques issus de l'exploitation des réacteurs expérimentaux du CEA

Les combustibles issus des réacteurs expérimentaux ou d'expertises menées par le CEA civil ont des origines, des natures et des conditionnements divers.

Les combustibles à base d'uranium métallique (famille CEA-2000) ont été utilisés dans les réacteurs de la filière UNGG, ainsi que dans les réacteurs expérimentaux EL2 et EL3 de la filière à Eau Lourde. Ces combustibles ont été conditionnés en étuis, puis regroupés par lot dans des conteneurs C1 ou C2 en acier inoxydable.

---

[8] Les deux réacteurs de 900 MWe du CNPE de Fessenheim ont été mis à l'arrêt en 2020.

[9] Ces conteneurs primaires diffèrent par leur diamètre et leur longueur, qu'ils soient qualifiés de « court » ou « long ».

Les combustibles « caramel » du réacteur OSIRIS (famille CEA-2100) sont constitués de petites plaquettes d'oxyde d'uranium enfermées dans une gaine en Zircaloy. Il existe deux géométries d'éléments combustible se différenciant par le nombre de plaquettes et leur enrichissement : des éléments standards et des éléments de contrôle. Une partie des éléments combustibles est entreposée en piscine à Cadarache, tandis que l'autre partie est conditionnée dans des conteneurs en acier inoxydable (de type ES ou EC), à raison de quatre éléments standards ou de contrôle par conteneur, et entreposée dans l'installation CASCAD.

Les combustibles dits « expérimentaux du CEA » regroupent les combustibles expérimentaux issus des réacteurs RAPSODIE (CEA-2210) et PHENIX (CEA-2220), de combustibles UOX et MOX issus de réacteurs REP et assimilés (CEA-2230), de combustibles MOX issus de réacteurs RNR (CEA-2240), de combustibles issus des réacteurs EL3 et EL4 (CEA-2250), de combustibles expertisés au LAMA (CEA-2260) ou entreposés à l'INB72 (CEA-2270). Ces combustibles sont constitués de différentes typologies (oxydes d'uranium ou mixte U-Pu, carbure, siliciure, etc.), différents enrichissements et taux de combustion et se présentent sous des formes géométriques variées (crayons, tronçons, fragments, etc.). Ils sont conditionnés en conteneurs en acier inoxydable de type C1, C2, C194 ou C194K après avoir été placés dans différents types d'étuis.

Les combustibles issus du réacteur à neutrons rapides PHENIX (famille CEA-2400) comprennent des assemblages fissiles et des assemblages fertiles. Ces assemblages sont constitués de différents types d'aiguilles dites fissiles classiques, fissiles de couverture axiale supérieure (CAS), et fertiles. Ces aiguilles, selon leur type, sont composées d'une gaine en acier inoxydable contenant des pastilles fissiles et/ou fertiles. Outre les aiguilles de géométrie PHENIX, cette famille comprend également des aiguilles fissiles de géométrie SUPERPHENIX présentant un diamètre et une longueur plus élevés.

Les combustibles issus du réacteur de recherche PHEBUS destiné à l'étude des accidents de REP (famille CEA-2500) ainsi que les combustibles provenant du réacteur de recherche CABRI de type piscine constitué d'un cœur à base d'oxyde d'uranium faiblement enrichi (famille CEA-2600) sont assimilables à des combustibles de type REP UOX.

Les combustibles d'EPOC (famille CEA-2700) proviennent du projet d'« évacuation des poubelles contenant des déchets combustibles » dont la cellule blindée est en cours de conception au CEA de Saclay. Ils ont des origines très diverses et peuvent s'apparenter à des combustibles de type métallique, UOX, MOX, etc.

Les combustibles du CEA issus de ces quatre familles (CEA-2400, CEA-2500, CEA-2600 et CEA-2700) sont conditionnés en conteneurs en acier inoxydable de type C194 après avoir été préalablement introduits en étuis.

2.2.1.2.3 Les combustibles oxydes et métalliques issus de l'exploitation des réacteurs de la propulsion nucléaire navale

Deux types de combustibles sont exploités dans les réacteurs de la propulsion nucléaire navale :

- les combustibles de type métallique (famille CEA-2300), constitués d'un alliage de U et Zr ;
- les combustibles de type oxyde (famille CEA-2350), composés de dioxyde d'uranium UO_2.

Les combustibles de type métallique (famille CEA-2300), exploités entre 1964 et 1996 dans l'installation prototype à terre (PAT) de Cadarache et dans les chaufferies embarquées de trois des six sous-marins dits SNLE de classe « Le Redoutable », sont conditionnés dans des conteneurs métalliques spécifiques.

Les combustibles de type oxyde (famille CEA-2350), utilisés depuis 1975 dans les chaufferies embarquées ou à terre de la propulsion nucléaire navale, sont actuellement entreposés en piscine dans l'attente d'être conditionnés.

2.2.1.3 Les colis de déchets FA-VL

Les incertitudes liées à la mise en place d'une filière de gestion des colis de déchets FA-VL conduisent à intégrer dans l'inventaire de réserve de l'INB Cigéo (8) une partie des colis de déchets radioactifs relevant de cette filière de gestion.

Colis de déchets FA-VL pris en compte dans l'inventaire de réserve

Les colis de déchets FA-VL pris en compte dans l'inventaire de réserve correspondent à :

- près de 13 000 colis de chemises et empilements de graphite issus de l'exploitation et du démantèlement des réacteurs à l'uranium naturel-graphite-gaz (UNGG) ;
- un peu plus de 3 000 colis de déchets dits « UNGG de La Hague » ;
- un peu plus de 32 900 colis de déchets bitumés relevant de la catégorie FA-VL ;
- 42 colis de déchets FA-VL des petits producteurs et du nucléaire diffus collectés par l'Andra.

La figure 2-4 représente la répartition des typologies de colis de déchets FA-VL de l'inventaire de réserve en fonction du nombre de colis primaires.

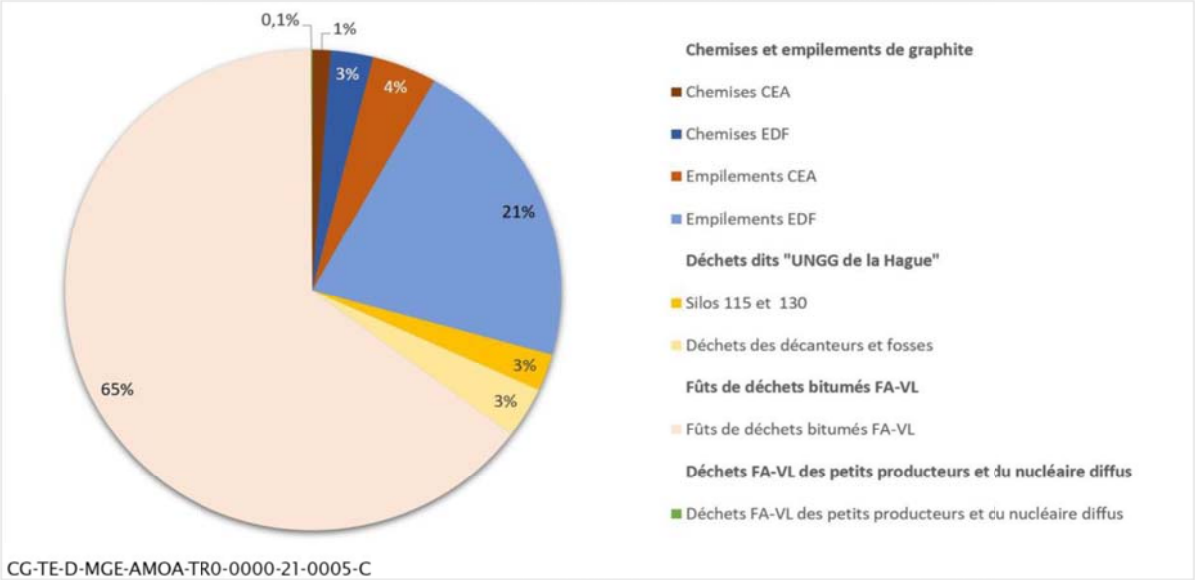


Figure 2-4 *Répartition du nombre de colis primaires selon les typologies de déchets FA-VL*

Ces colis de déchets FA-VL répartis en 31 familles sont décrits succinctement dans les paragraphes suivants. Seuls les colis de déchets bitumés (famille CEA-6010) et quelques colis de déchets FA-VL des petits producteurs et du nucléaire diffus (famille AND-7010) ont déjà été produits. Pour toutes les autres familles de colis, la production n'a pas encore démarré mais la définition de leur conditionnement est déjà bien avancée.

2.2.1.3.1 Les chemises en graphite du CEA et d'EDF

Les déchets de chemises de graphite proviennent de l'exploitation des réacteurs de la filière uranium naturel graphite gaz (UNGG) des sites de Chinon et de Saint-Laurent-des-Eaux.

Ceux issus de l'exploitation des réacteurs Chinon A2 et A3 sont composés des produits résultant des opérations de déchemisage consistant à séparer la selle et les fils de selle du graphite des chemises. Les chemises de graphite (famille CEA-3060) sont entreposées actuellement dans les fosses GR1 à GR4 de l'installation MAR 400 de Marcoule tandis que les déchets issus du déchemisage (famille CEA-3070) sont entreposés dans la fosse FS de cette installation.

Ceux issus de l'exploitation des réacteurs Saint-Laurent A1 et Saint-Laurent A2 (famille EDF-3070) sont composés de chemises de graphite, de rondins en graphite, de fils de selle des chemises de Saint-Laurent ainsi que de déchets technologiques utilisés lors de l'exploitation de ces réacteurs. Ils sont actuellement entreposés dans deux silos semi-enterrés implantés sur le site de Saint-Laurent-des-Eaux.

Le mode de stockage envisagé est le stockage direct et le conditionnement des déchets pris en compte à ce stade pour les études est le suivant :

- conteneur en béton fibre cubique dont le couvercle est boulonné (CBFK-B) pour les déchets des familles CEA-3060 et CEA-3070. Les déchets seront bloqués par une matrice cimentaire ;
- conteneur de type CS4, dit « CS4 graphite », pour les déchets de la famille EDF-3070.

2.2.1.3.2 Les empilements de graphite du CEA et d'EDF

Les empilements de graphite proviennent également de l'exploitation par le CEA et EDF des réacteurs électronucléaires et expérimentaux de la filière UNGG.

Ceux du CEA sont issus des réacteurs électronucléaires G1, G2 et G3 sur le site de Marcoule (familles CEA-3010, CEA-3021, CEA-3022, CEA-3031 et CEA-3032) et des réacteurs expérimentaux EL2, EL3 et Rapsodie sur les sites de Saclay et de Cadarache (familles CEA-3040, CEA-3050 et CEA-3080) qui correspondent à la première génération de réacteurs de la filière UNGG.

Ceux d'EDF (briques et rondins) sont issus des réacteurs électronucléaires Chinon A1, A2 et A3 (familles EDF-3040, EDF-3050 et EDF-3060), des réacteurs électronucléaires Saint-Laurent A1 et A2 (familles EDF-3021, EDF-3022, EDF-3031 et EDF-3032) puis du réacteur électronucléaire Bugey 1 (familles EDF-3011 et EDF-3012) qui correspondent à la seconde génération de réacteurs de cette filière.

Par analogie avec les déchets de chemises de graphite, le mode de stockage envisagé est le stockage direct et le conditionnement des déchets pris en compte à ce stade pour les études est le suivant :

- conteneur en béton fibre cubique dont le couvercle est boulonné (CBFK-B) pour les empilements du CEA (familles CEA-3010, CEA-3021, CEA-3022, CEA-3031, CEA-3032, CEA-3040, CEA-3050 et CEA-3080). Les déchets seront bloqués par une matrice cimentaire ;
- conteneur de type CS4, dit « CS4 graphite », pour les empilements d'EDF (familles EDF-3011, EDF-3012, EDF-3021, EDF-3022, EDF-3031, EDF-3032, EDF-3040, EDF-3050 et EDF-3060).

2.2.1.3.3 Les déchets « UNGG de La Hague »

Les déchets dits « UNGG de La Hague » proviennent du retraitement entre 1966 et 1987 des combustibles de la filière UNGG dans l'usine UP2-400 du site d'Orano La Hague. Ils se présentent sous deux formes.

Les déchets de structure, issus des réacteurs des sites de Chinon, Saint-Laurent-des-Eaux, Bugey et Vandellos, sont composés de graphite (chemises et selles), de magnésium (gaines, bouchons, centreurs), d'acier inoxydable (fils de selles) et de résidus d'uranium. Ils sont entreposés dans le silo 115 et le stockage organisé des déchets (SOD) (famille COG-3020) ainsi que dans le silo 130 (famille COG-3010).

Les déchets de faible granulométrie, issus du procédé de retraitement des combustibles UNGG, sont constitués de poudre de graphite, de diatomées, de zéolithes et de résines échangeuses d'ions usées générées par le traitement d'eau des piscines de déchargement et d'entreposage des combustibles. Ils sont entreposés dans les décanteurs 1 (famille COG-3030), 2 (famille COG-3040) et 8 (famille COG-3050) ainsi que dans les fosses 211-06 (famille COG-3070), 217-01 et 217-02 (famille COG-3060) de l'atelier dégainage.

Le conditionnement retenu par Orano pour ces déchets est :

- après neutralisation de la réactivité des métaux, une cimentation dans un fût en acier inoxydable, dit « fût ECE », pour les déchets des familles COG-3010 et COG-3020 ;
- une cimentation en conteneur béton fibres cylindrique à pâle perdue dit CBF-C2K pour les déchets des familles COG-3030, COG-3040, COG-3050, COG-3060 et COG-3070.

2.2.1.3.4 Les colis de déchets bitumés du CEA

Les déchets bitumés du CEA proviennent du traitement au sein de la Station de traitement des effluents liquides (STEL) de Marcoule des effluents liquides issus de la première usine de retraitement des combustibles usés, UP1. Les procédés qui permettent de fixer dans des « boues » la radioactivité contenue dans les effluents de faibles et moyennes activités, puis d'incorporer celles-ci dans du bitume avant de les conditionner dans des fûts métalliques, ont évolué en fonction des effluents à traiter depuis le démarrage de la STEL en 1966.

Les colis de déchets bitumés relevant de la catégorie FA-VL et produits entre 1966 et 1995 représentent les colis anciens les moins radioactifs (famille CEA-6010). En l'absence de critères permettant de définir les caractéristiques radiologiques d'un colis de déchet FA-VL, les producteurs ont retenu à ce stade des caractéristiques radiologiques permettant de distinguer les colis FA-VL basées sur les spécifications d'acceptation du CSA. Ainsi, les caractéristiques radiologiques qui permettent de les distinguer des colis relevant de la catégorie MA-VL produits à la même période sont les suivantes :

- activité alpha à 300 ans inférieure à 10,72 GBq par fût ;
- débit de dose au contact du fût inférieure à 60 mGy/h à la date de reconditionnement en colis de stockage définitif.

L'ensemble des colis de déchets bitumés fait l'objet par le CEA d'opérations de reprise, de caractérisation et de reconditionnement en surfûts de type EIP de 380 L avant entreposage à l'EIP (entreposage intermédiaire polyvalent) sur le site de Marcoule. La reprise de la totalité des colis de déchets bitumés entreposés dans les fosses enterrées de la zone nord de Marcoule et dans les casemates 1 et 2 de la zone sud a été effectuée (autour de 10 000 colis) et celle des colis entreposés dans les casemates 3 à 13 de la STEL est en cours.

Dans le cadre des études d'adaptabilité, il n'est pas retenu le traitement de ces colis de déchets bitumés avant leur mise en conteneur de stockage (les hypothèses retenues pour la constitution en colis de stockage des colis de l'inventaire de réserve sont présentées au chapitre 2.2.2 du présent volume). Ceci constitue une démarche prudente permettant, au stade esquisse des études d'adaptabilité, de couvrir l'ensemble des enjeux de sûreté en lien avec le stockage des déchets bitumés.

2.2.1.3.5 Les déchets des petits producteurs et du nucléaire diffus collectés par l'Andra

Les déchets des petits producteurs et du nucléaire diffus collectés par l'Andra regroupent plusieurs types de déchets FA-VL : sources de détecteurs ioniques de fumée (famille AND-7000), paratonnerres compactés (famille AND-7010) et divers déchets issus de la Défense nationale (famille AND-7020).

Les détecteurs ioniques de fumée fabriqués et installés en France dès le début des années 1940 contiennent principalement des sources à l'^{241}Am mais certains sont équipés de sources au ^{226}Ra. L'Andra les collecte au fur et à mesure en prévision de les conditionner.

Les paratonnerres compactés fabriqués en France entre 1932 et 1983 sont équipés de sources à l'^{241}Am, de sources au ^{226}Ra ou de sources contenant ces deux radioéléments. Les colis de paratonnerres démontés et compactés sont déjà conditionnés et entreposés au Cires.

Les déchets issus de matériels réformés des armées ou de déchets produits par les établissements de la Défense nationale sont de natures très diverses. Il s'agit essentiellement de petits objets réformés incorporant des peintures luminescentes au radium ou au tritium (boussoles, plaques, lignes de mire,

cadrans, etc.). Il est prévu que ces objets considérés pour la plupart comme des sources scellées usagées soient pris en charge par l'Andra.

Ainsi, les déchets de la famille AND-7010 actuellement entreposés au Cires ont été conditionnés en conteneur de 870 litres (870 L 313 FI) après immobilisation par injection d'un matériau à base de ciment.

Pour les deux autres familles de déchets dont les colis ne sont pas encore produits (familles AND-7000 et AND-7020), il est également envisagé un conditionnement en conteneur de type 870 L 313 FI. Pour les déchets de la famille AND-7000, il est prévu qu'ils soient pré-bétonnés ou non selon qu'ils contiennent respectivement du ^{226}Ra ou de l'^{241}Am.

DIFFÉRENCES EN MATIÈRE DE CONDITIONNEMENT DES COLIS DE DÉCHETS FA-VL AVEC LES COLIS DE DÉCHETS MA-VL

Les déchets de structure « UNGG de La Hague », les colis de déchets bitumés, les déchets collectés par l'Andra et les chemises et empilements d'EDF font l'objet de conditionnements déjà existants pour les colis de déchets MA-VL de l'inventaire de référence (cf. Volume 3 du présent rapport) qui sont respectivement les fûts ECE, les surfûts EIP, les conteneurs 870 L 313 FI et les conteneurs de type CS 4 dont la géométrie de la réservation interne est légèrement adaptée pour le conditionnement primaire des empilements graphite d'EDF.

Les chemises et empilements du CEA et les déchets de faible granulométrie « UNGG de La Hague » de l'inventaire de réserve (respectivement 5 % et 3 % des colis de déchets FA-VL) font l'objet d'un conditionnement spécifique aux familles des colis de déchets FA-VL en conteneurs CBFK-B et CBF-C2K[10].

2.2.2 Les colis de stockage

Pour vérifier la faisabilité du stockage des colis de l'inventaire de réserve, des modes de stockage sont retenus dans le cadre des études d'adaptabilité. Ces choix ne préjugent pas de ce qui sera effectivement retenu dans le cas où serait prise la décision de stocker tout ou partie de ces colis.

Ainsi, les colis de déchets HA et MA-VL inclus à l'inventaire de réserve étant identiques à ceux de l'inventaire de référence, les conteneurs de stockage et les modes de stockage de ces colis sont également les mêmes.

La forme géométrique et les caractéristiques thermiques et irradiantes des combustibles usés étant similaires et/ou de même ordre de grandeur[11] que celles des colis de déchets HA, le principe de stockage en conteneurs retenu pour les colis de déchets HA est reconduit pour les combustibles usés. Les conteneurs de stockage considérés pour ces colis dans le cadre des études d'adaptabilité sont ainsi semblables, en termes de conception, aux conteneurs de stockage des colis de déchets HA vis-à-vis de la nature du matériau et de son épaisseur et les géométries sont adaptées à toutes les typologies de combustibles usés présents dans l'inventaire de réserve.

Les conteneurs de stockage conçus pour les colis de déchets HA et adaptés géométriquement aux combustibles usés sont décrits au chapitre 2.2.2.1 du présent volume.

Pour certains colis de déchets FA-VL dont les typologies sont similaires à celles des colis de déchets MA-VL (colis de déchets bitumés en surfûts EIP, fûts ECE ou déchets collectés par l'Andra conditionnés en conteneur de 870 litres), le mode de stockage en conteneur est retenu comme pour les colis de déchets MA-VL. Pour les autres colis de déchets FA-VL, le mode de stockage direct est considéré.

---

[10] Le mode de stockage retenu pour ces colis à ce stade est le stockage direct. Ils sont donc présentés plus en détail dans le chapitre 2.2.2.2 ci-après du présent volume.

[11] Concernant les caractéristiques thermiques, le paroxysme de température des colis de déchets HA est d'environ 80 °C (de 10 ans à 15 ans après la mise en place des colis) tandis qu'il est de l'ordre de 90 °C pour les colis de combustibles usés (de 40 ans à 50 ans après mise en place des colis).

Les colis de stockage retenus pour les colis de déchets MA-VL et FA-VL de l'inventaire de réserve sont décrits au chapitre 2.2.2.2 du présent volume.

2.2.2.1 Les colis de stockage HA et CU

La solution retenue pour les colis de déchets HA de l'inventaire de référence et présentée au chapitre 2 du volume 3 du présent rapport est la mise en conteneur préalablement à leur stockage. Ces conteneurs sont de forme cylindrique. Leur enveloppe est constituée d'un corps, d'un fond et d'un couvercle en acier non allié à bas carbone ainsi que de quatre patins et matériels de blocage (clavette et cale) comme illustré en figure 2-5. L'épaisseur de la virole permet de limiter le débit de dose au pseudo-contact du conteneur et l'influence de la radiolyse sur la cinétique de corrosion. Enfin, la largeur et le diamètre sont adaptés aux dimensions des colis primaires qu'ils contiennent.

Les colis de stockage HA associés à l'inventaire de réserve sont les mêmes que ceux de l'inventaire de référence. Parmi les six modèles retenus pour les colis de déchets HA de l'inventaire de référence (CS 10-1, CS 10-2, CS 10-4, CS 13, CS 14 et CS 15), celui correspondant aux colis de déchets vitrifiés COG-800 et COG-200 considérés dans l'inventaire de réserve est le CS 15, également nommé « CS R7/T7 Chaud ».

Le mode de stockage retenu pour les colis de combustible doit répondre aux mêmes fonctions de sûreté et exigences que celles associées aux colis de stockage HA, ainsi qu'aux mêmes besoins en termes de protection pendant les opérations de transfert, de mise en stockage et, le cas échéant, de retrait d'exploitation. Les conteneurs de stockage prévus pour recevoir les combustibles usés dans le cadre de l'adaptabilité sont donc de conception identique à ceux conçus pour les colis de déchets HA.

Par ailleurs, un conteneur de stockage est prévu par type de colis primaire en fonction de leur géométrie avec une épaisseur de virole identique.

Les colis de stockage de combustibles usés ainsi considérés sont listés dans le tableau 2-4 ci-après.

Tableau 2-4 Inventaire des colis de stockage de combustibles usés

Type de colis primaire CU	Identifiant des familles	Type de colis de stockage CU
AA281 combustibles EL4	EDF-2300	CS CU 1
C1 ou C2 combustibles EL4	EDF-2300	CS CU 2
C1 ou C2 combustibles UNGG	CEA-2000 (A, B)	CS CU 3
C1 ou C2 combustibles expérimentaux	CEA-22XX[12]	CS CU 4
Combustibles expérimentaux en C2L	CEA-2230 G	CS CU 5
Combustibles « ES » d'Osiris	CEA-2100 A	
Combustibles « EC » d'Osiris	CEA-2100 B	CS CU 6
C194 et C194K	CEA-22XX et 2X00[13]	CS CU 7
CPNM-L et CPNM-C	CEA-2300	CS CU 8

[12] CEA-2210 (A, B, C), CEA-2230 (C, D, E, H), CEA-2240, CEA-2250, CEA-2260, CEA-2270 A.
[13] CEA-2210 B, CEA-2220 (A, B), CEA-2230 (A, B, F, G), CEA-2270 (A, B, C), CEA-2400 (A, B, C, D), CEA-2500, CEA-2600, CEA-2700 (A, B, C, D).

Type de colis primaire CU		Identifiant des familles	Type de colis de stockage CU
Espadon court et long combustibles UOX	Court	CEA-2350	CS CU 9
	Long		CS CU 10
TA combustibles métalliques de la PN	TA1167	CEA-2300	CS CU 11
	TA1182		CS CU 12
	TA1387		CS CU 13
	TA1437		CS CU 14
	TA2015		CS CU 15
	TA2192		CS CU 16
MOX SPX "Pieds d'assemblages coupés"		EDF-2200, EDF-2210, EDF-2220, EDF-2230	CS CU 17
UNE et URE longs CP-E		EDF-2010, EDF-2030, EDF-2040, EDF-2050	CS CU 18
UNE et URE longs CP-I			CS CU 19
MOX G1 et G2, UNE et URE courts CP-E		EDF-2000, EDF-2020, EDF-2100, EDF-2110	CS CU 20
MOX G1 et G2, UNE et URE courts CP-I			CS CU 21
MOX G3 et G4 CP-E		EDF-2120, EDF-2130	CS CU 22
MOX G3 et G4 CP-I			CS CU 23
C194 allongé		CEA-2400 (E, F)	CS CU 24

La figure 2-5 ci-dessous illustre les dimensions géométriques maximales que peuvent atteindre un colis de stockage de combustibles usés[14] en comparaison avec celles d'un colis de stockage HA.

[14] Les colis de combustibles usés conduisant aux plus grandes dimensions de colis de stockage sont de typologie UNE ou URE long (EDF-2010, EDF-2030, EDF-2040 et EDF-2050).

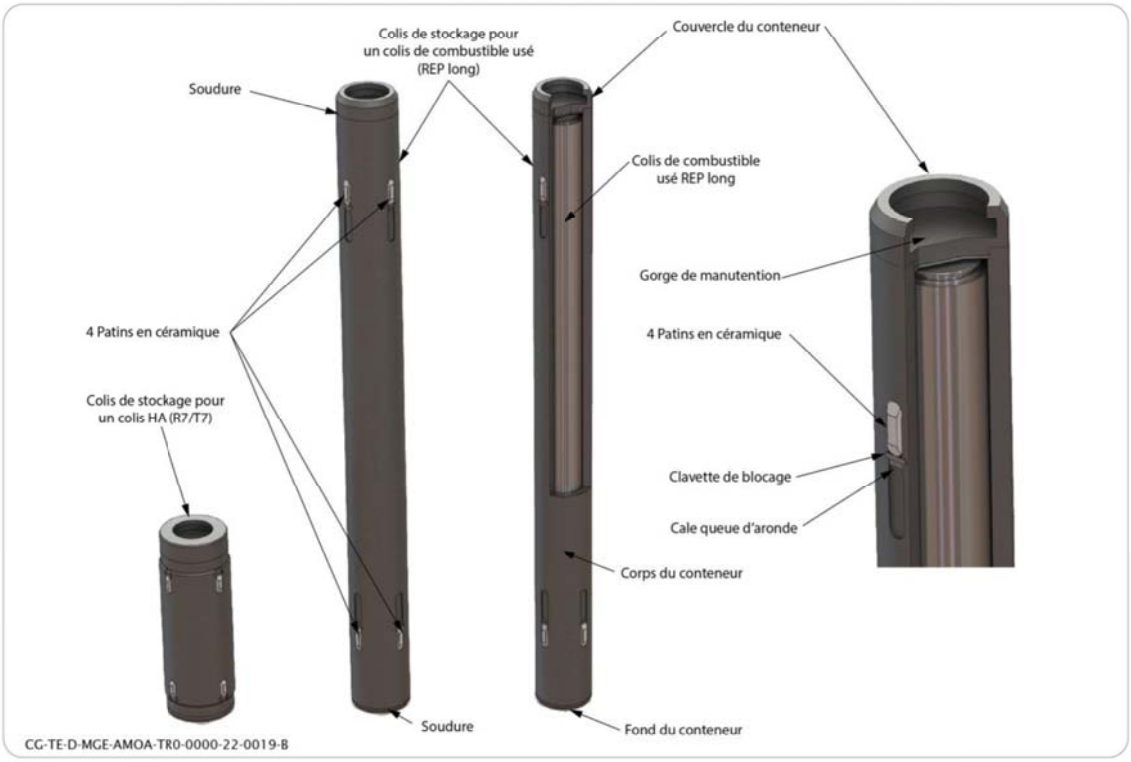


Figure 2-5 *Illustration d'un conteneur de stockage de colis de combustible usé et comparaison avec celui d'un colis de déchet HA*

Dans le cas de l'allongement de la durée de fonctionnement du parc, l'augmentation de la production d'un peu moins de 10 000 colis de déchets vitrifiés de type COG-200 et COG-800 par rapport à ce qui est considéré dans le cas de l'inventaire de référence (cf. Scénario SR1 tel que présenté au chapitre 2.1.2 du présent volume) entraine une augmentation identique, de l'ordre de 17 %, du volume de stockage de colis de déchets HA.

Dans le cas de l'arrêt anticipé du retraitement de l'ensemble des combustibles usés concomitant à l'allongement de la durée de fonctionnement du parc (cf. Scénario SNR enveloppe tel que présenté au chapitre 2.1.2 du présent volume), l'augmentation d'environ 85 %[15] du nombre de colis de type HA et de combustibles usés à stocker par rapport au nombre de colis HA de l'inventaire de référence entraine une multiplication par trois du volume total de colis de stockage. Les combustibles usés en provenance du CEA, qui constituent près de 7 % du nombre de colis de combustibles usés, représentent un peu moins de 2 % du volume de colis de stockage pour les combustibles usés. La figure 2-6 représente la répartition des colis de déchets HA et des combustibles usés de l'inventaire de réserve selon leur volume en colis de stockage d'après les hypothèses du scénario SNR enveloppe.

[15] Cette augmentation correspond à la combinaison de l'augmentation du nombre de colis de combustibles usés et de la diminution du nombre de colis HA du fait d'un arrêt anticipé du retraitement des combustibles usés.

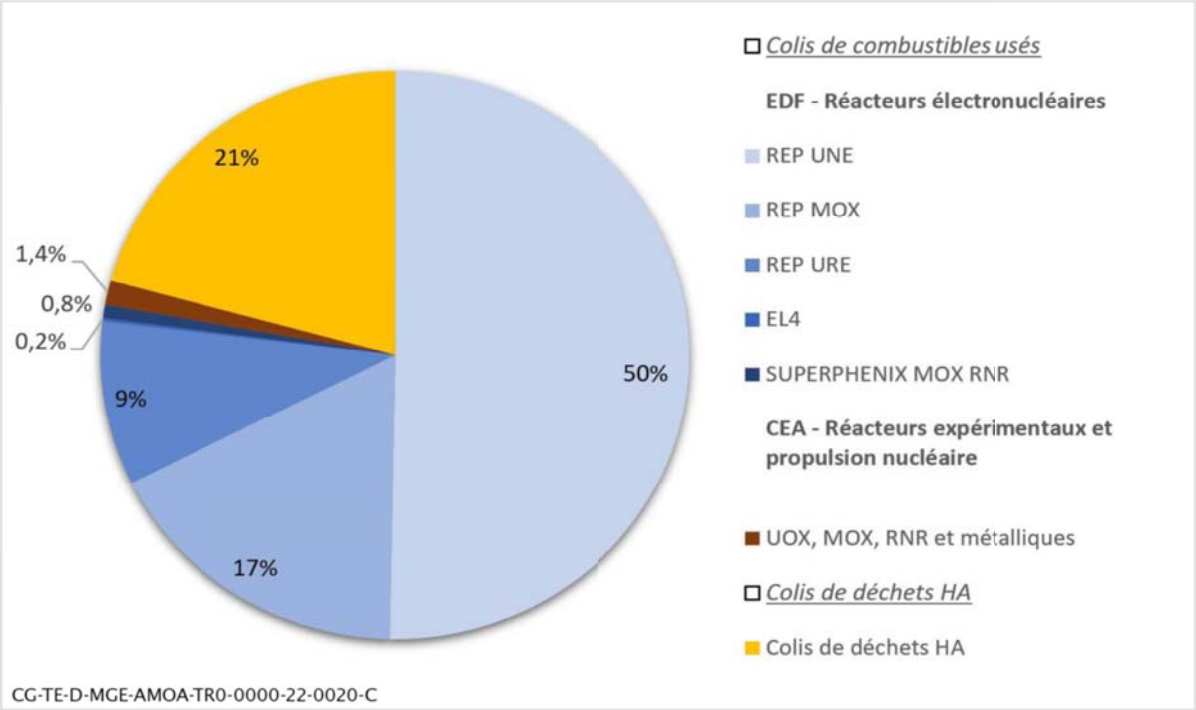


Figure 2-6 *Répartition du volume de colis de stockage selon les différentes typologies de combustibles usés et de déchets HA– Scénario SNR enveloppe*

2.2.2.2 Les colis de stockage MA-VL et FA-VL

Les deux modes de stockage retenus pour les colis de déchets MA-VL de l'inventaire de référence et présentés au chapitre 2 du volume 3 du présent rapport sont :

- le stockage de colis primaires directement en alvéole de stockage ;
- le stockage des colis primaires après mise en conteneur de stockage.

Les seuls colis de déchets MA-VL considérés dans l'inventaire de réserve, induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc, sont les colis C1PG^{SP} (famille EDF-080). Ces colis font l'objet d'un stockage direct.

Pour les colis de déchets FA-VL qui font l'objet de conditionnements déjà existants dans le cas des colis de déchets MA-VL de l'inventaire de référence (*i.e.* Plus de 90 % des colis de déchets FA-VL, cf. Chapitre 2.1.3 du présent volume), les modes de stockage retenus pour l'inventaire de référence sont reconduits et sont définis selon les caractéristiques des familles de ces colis. Ainsi, les fûts ECE, les surfûts EIP et les conteneurs 870 L 313 FI sont conditionnés respectivement dans les conteneurs de stockage CS 3, CS 4.1 et CS 5 tel qu'indiqué dans le tableau 2-5 ci-après.

Pour les autres familles de colis de déchets FA-VL, le mode de stockage retenu est le stockage direct. Les caractéristiques de ces colis illustrés par la figure 2-7 sont les suivantes :

- le colis de type CBFK-B est un colis de géométrie parallélépipédique constitué avec un béton armé renforcé de fibres métalliques et un couvercle préfabriqué vissé et scellé avec un mortier sur le corps pour assurer l'étanchéité ;
- le colis de type CS4 graphite est un colis de géométrie parallélépipédique constitué avec un béton armé et un couvercle préfabriqué et vissé sur le corps. Ses dimensions et les matériaux qui le constituent sont similaires au conteneur de stockage MA-VL de type CS4. Seule la géométrie de la réservation interne pour les déchets est différente ;

- le colis de type CBF-C2K est un colis de géométrie cylindrique constitué avec un béton renforcé de fibres métalliques, d'une coque interne en acier et d'un bouchon coulé après mis en place des déchets. Ce colis peut également être placé en conteneur de stockage.

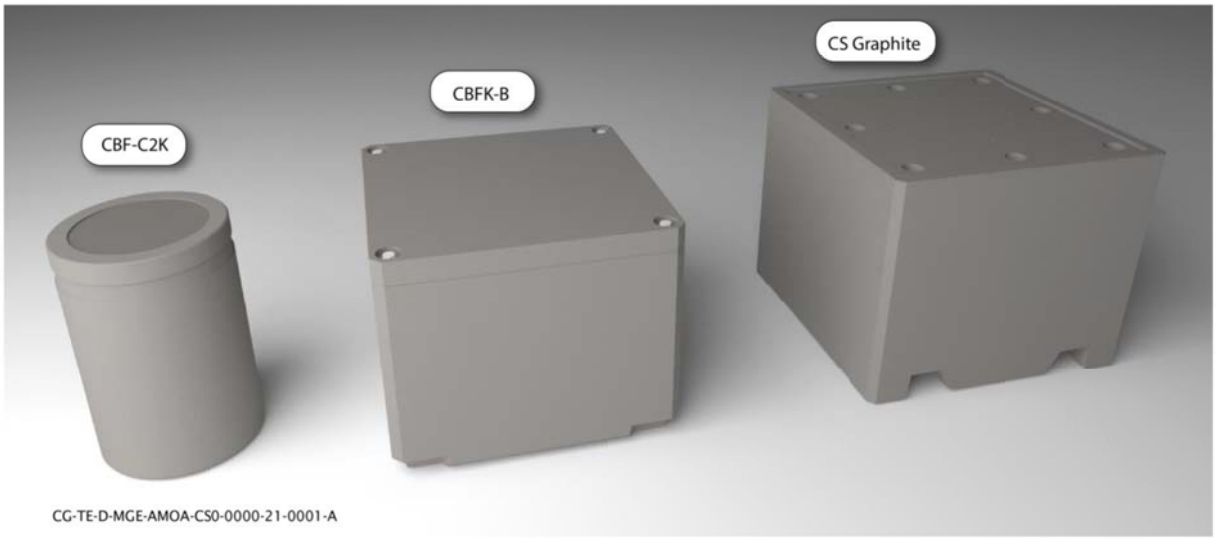


Figure 2-7 *Illustration des colis spécifiques aux déchets FA-VL : CBF-C2K, CBFK-B et CS4 graphite*

L'ensemble des colis de stockage FA-VL considérés dans le cadre des études d'adaptabilité sont listés dans le tableau 2-5 ci-après.

Tableau 2-5 *Inventaire des colis de stockage FA-VL*

Type de colis primaire FA-VL	Identifiant des familles	Type de colis de stockage FA-VL
Fût ECE	COG-3010, COG-3020	CS 3
EIP	CEA-6010	CS 4.1
870 L 313 FI	AND-7000, AND-7010, AND-7020	CS 5
CBFK-B	CEA-3010, CEA-3021, CEA-3022, CEA-3031, CEA-3032, CEA-3040, CEA-3050, CEA-3060, CEA-3070, CEA-3080	Stockage direct
CS4 graphite	EDF-3011, EDF-3012, EDF-3021, EDF-3022, EDF-3031, EDF-3032, EDF-3040, EDF-3050, EDF-3060, EDF-3070	Stockage direct
CBF-C2K	COG-3030, COG-3040, COG-3050, COG-3060, COG-3070	Stockage direct ou CS 2.1

L'augmentation du nombre de colis de déchets MA-VL induite par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc entraine une augmentation négligeable du volume de colis de stockage MA-VL, de l'ordre de 0,1 %.

Le volume de stockage associé aux colis de déchets FA-VL représente environ 75 % du volume de stockage associé aux colis de déchets MA-VL. Les colis de déchets bitumés FA-VL qui constituent près de deux-tiers du nombre de colis primaires FA-VL de l'inventaire de réserve, ne représentent plus qu'un tiers du volume de colis de stockage associé, tandis que les chemises et empilement de graphite en représentent près de 60 % (avec la moitié du volume de colis de stockage FA-VL qui correspond aux empilements de graphite) alors qu'ils constituent un peu moins de 30 % du nombre de colis primaires.

La figure 2-8 représente la répartition des colis de déchets FA-VL de l'inventaire de réserve selon leur volume en colis de stockage.

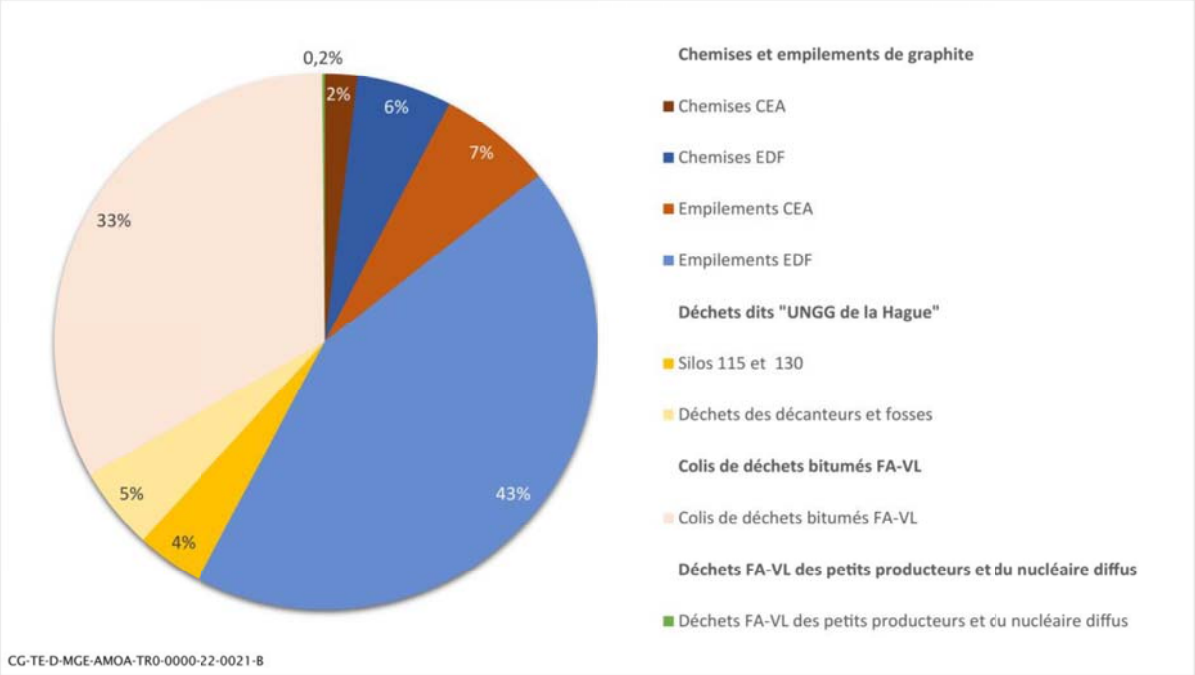


Figure 2-8 *Répartition du volume de colis de stockage selon les différentes typologies de déchets FA-VL*

2.2.3 Les inventaires en substances radioactives et toxiques chimiques des colis de déchets

2.2.3.1 La démarche de construction et de présentation des inventaires radiologiques des colis de l'inventaire de réserve

Comme pour les colis de déchets de l'inventaire de référence (cf. Chapitre 3.1 du volume 3 du présent rapport), les inventaires radiologiques des colis de l'inventaire de réserve, qui correspondent aux activités radiologiques des 144 radionucléides d'intérêt, sont déclarés par les producteurs dans les dossiers de connaissance. Selon les valeurs d'activités radiologiques considérées, ces inventaires sont dits « moyen » ou « maximal ».

2.2.3.1.1 Les inventaires radiologiques retenus pour les évaluations de sûreté après-fermeture

La méthodologie de construction de l'inventaire radiologique des colis de l'inventaire de réserve pour les évaluations de sûreté après-fermeture est identique à celle utilisée pour les colis de déchets de l'inventaire de référence (cf. Chapitre 3 du volume 3 du présent rapport). L'inventaire retenu est construit à partir de l'inventaire moyen par famille de colis, obtenu à partir des activités massiques moyennes pour chaque radionucléide, auquel est appliqué un facteur de marge défini selon le niveau de connaissance de la famille. Les facteurs définis pour les familles de colis de déchets de l'inventaire de référence selon leur niveau de connaissance, rappelés dans le tableau 2-6, sont reconduits aux familles de colis de l'inventaire de réserve. L'ensemble des activités massiques obtenues est ensuite compilé aux différentes échelles : colis primaires, familles de colis et quartier de stockage.

Tableau 2-6 *Facteurs de marge appliqués aux activités en fonction du niveau de connaissance*

Niveau de connaissance attribué aux familles		Facteur multiplicateur appliqué à l'activité moyenne déclarée de chaque radionucléide
Incertitudes résiduelles faibles sur l'inventaire radiologique	3	1,5
Niveau de connaissance intermédiaire	2	2,0
Incertitudes résiduelles sur l'inventaire radiologique susceptibles d'être réduites	1	5,0
Familles sans inventaire radiologique (définition par « périmètre d'analogies »)	0	10,0

Dans le **cas de l'allongement de la durée de fonctionnement du parc** (cf. Scénario SR1 tel que présenté au chapitre 2.1.2 du présent volume), le tableau 2-7 présente, pour chaque typologie de déchets, la répartition du nombre de colis primaires de l'ensemble de l'inventaire selon le facteur de marge appliqué.

Cette répartition est proche de celle obtenue pour l'inventaire de référence :

- près de 93 % des colis primaire HA sont bien caractérisés (niveau 2 et 3). L'augmentation de 17 % du nombre de colis primaire HA est liée à deux familles de CSD-V (COG-800 et COG-200) dont le niveau de connaissance retenu est de 2 ;
- l'augmentation du nombre de colis MA-VL étant négligeable, 46 % des colis primaires MA-VL sont bien caractérisés comme pour l'inventaire de référence.

Tableau 2-7 *Répartition à date des facteurs de marge appliqués aux inventaires radiologiques au prorata du nombre de colis primaires pour le cas de l'allongement de la durée de fonctionnement du parc (scénario SR1)*

Typologie de déchets	Facteur de marge	Répartition au prorata du nombre de colis primaires
HA	1,5	10,2 %
	2	82,6 %
	5	6,7 %
	10	0,5 %
MA-VL	1,5	5,5%
	2	40,6 %
	5	50,7 %
	10	3,2 %

Dans le **cas de l'arrêt anticipé du retraitement de l'ensemble des combustibles usés concomitant à l'allongement de la durée de fonctionnement du parc** (cf. Scénario SNR enveloppe tel que présenté au chapitre 2.1.2 du présent volume), le tableau 2-8 présente, pour chaque typologie de déchets, la répartition du nombre de colis primaires de l'ensemble de l'inventaire selon le facteur de marge appliqué.

La répartition associée aux colis de déchets de type HA et MA-VL est très légèrement différente de celle du scénario SR1 et de celle de l'inventaire de référence du fait d'une diminution de colis primaires HA et MA-VL provenant majoritairement des familles COG-200 et COG-120 (déchets issus du retraitement des assemblages UOX/URE/MOX) dont le niveau de connaissance retenu est 2 :

- plus de 90 % des colis primaire HA sont bien caractérisés (niveau 2 et 3) ;
- près de 38 % des colis primaire MA-VL sont bien caractérisés.

En outre, l'inventaire radiologique global associé aux combustibles usés est relativement peu margé avec plus de 96 % des colis bien caractérisés. Cela s'explique par le fait que près de 94 % des colis de combustibles usés proviennent des réacteurs électronucléaires d'EDF dont le niveau de connaissance attribué aux familles est de 2.

Tableau 2-8 *Répartition à date des facteurs de marge appliqués aux inventaires radiologiques au prorata du nombre de colis primaires pour le cas de l'arrêt anticipé du retraitement de l'ensemble des combustibles usés concomitant à l'allongement de la durée de fonctionnement du parc (scénario SNR enveloppe)*

Typologie de déchets	Facteur de marge	Répartition au prorata du nombre de colis primaires
HA	1,5	17,7 %
	2	72,8 %
	5	8,7 %
	10	0,8 %
MA-VL	1,5	6,5 %
	2	31,2 %
	5	58,6 %
	10	3,7 %
CU	Aucun[16]	3,2 %
	1,5	0,0 %
	2	96,6 %
	5	0,2 %
	10	0,0 %

[16] En accord avec l'Andra, pour les familles de combustibles usées issues de la propulsion nucléaire, les marges sur les inventaires radiologiques ont été appliquées en amont par le producteur. Aucun nouveau facteur de marge n'y est donc appliqué à nouveau.

Dans le **cas du stockage de colis de déchets FA-VL** (cf. Incertitudes sur les nouvelles filières tel que présenté au chapitre 2.1.3 du présent volume), le tableau 2-9 présente la répartition du nombre de colis primaires selon le facteur de marge appliqué. Pour cette typologie de déchets, seuls 21 % des colis sont bien caractérisés.

Tableau 2-9 *Répartition à date des facteurs de marge appliqués aux inventaires radiologiques au prorata du nombre de colis primaires pour le cas du stockage de colis de déchets FA-VL*

Typologie de déchets	Facteur de marge	Répartition au prorata du nombre de colis primaires
FA-VL	1,5	0,0 %
	2	20,9 %
	5	79,1 %
	10	0,0 %

Dans le cadre des évaluations de sûreté après-fermeture du stockage des colis de l'inventaire de réserve, deux cas d'architecture sont considérés (cf. Chapitre 4.3.1.1 du présent volume) :

- cas du stockage des colis de déchets HA et MA-VL induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc associé au stockage des colis de déchets FA-VL (Scénario SR1 + FA-VL) ;
- cas du stockage des combustibles usés associé au stockage des colis de déchets FA-VL (Scénario SNR enveloppe + FA-VL).

En appliquant les facteurs de marge mentionnés ci-avant, les activités des colis du **cas d'architecture du scénario SR1 + FA-VL** à la date de fermeture du centre de stockage sont principalement issues des colis de déchets de type HA. La figure 2-9 présente ces activités (en Bq) pour quatre radionucléides d'intérêt particulier pour les évaluations de sûreté après-fermeture et les compare aux activités des colis de déchets de l'inventaire de référence (scénario SR2). Ainsi, l'ajout d'environ 17 % de colis de déchets HA (COG-200 et COG-800) engendre une augmentation de l'activité radiologique :

- de 3 % pour le ^{14}C ;
- de 17 % pour le ^{36}Cl ;
- de 10 % pour le ^{79}Se ;
- de 16 % pour l'^{129}I.

Par ailleurs, au regard des autres typologies de déchets, l'augmentation des activités radiologiques liées à l'ajout des colis de déchets FA-VL reste négligeable pour ces radionucléides d'intérêt.

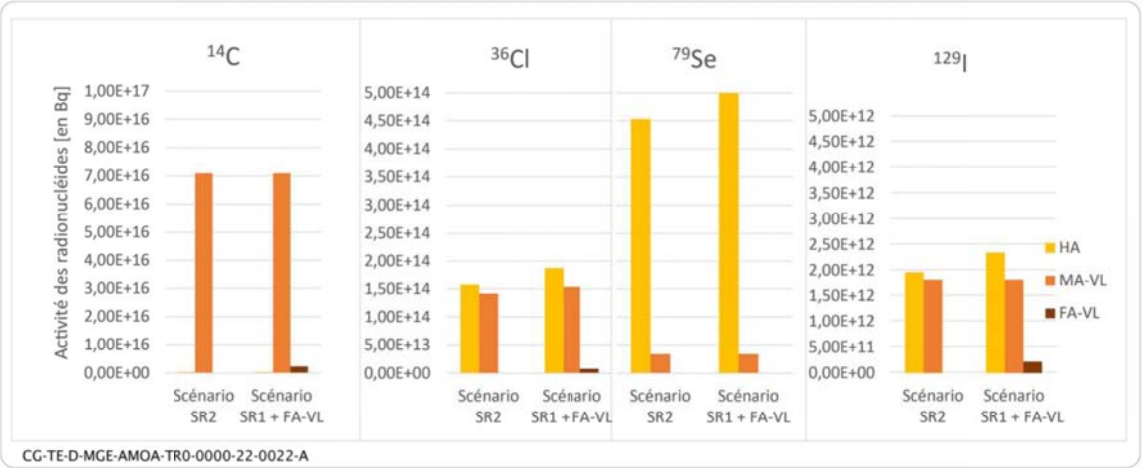


Figure 2-9 *Comparaison des activités du carbone 14, du chlore 36, du sélénium 79 et de l'iode 129 pour les colis de déchets HA, MA-VL et FA-VL entre le scénario SR2 et le scénario SR1 + FA-VL*

De même, en appliquant les facteurs de marge mentionnés ci-avant, les activités des colis du **cas d'architecture du scénario SNR enveloppe + FA-VL** à la date de fermeture du centre de stockage sont principalement issues des colis de combustibles usés et dans une proportion bien plus faible mais non négligeable, sont issues des colis de déchets de type HA. La figure 2-10 présente ces activités (en Bq) pour quatre radionucléides d'intérêt particulier pour les évaluations de sûreté après-fermeture et les compare aux activités des colis de déchets de l'inventaire de référence (scénario SR2).

Ainsi, l'ajout des colis de combustibles usés complété par le retrait des colis de déchets HA et MA-VL correspondant aux combustibles qui n'auraient pas été retraités engendre une augmentation de l'activité :

- de 4 % pour le ^{14}C ;
- nulle pour le ^{36}Cl : l'augmentation de l'activité liée aux colis de déchets MA-VL, FA-VL et combustibles usés d'environ 30 % est compensée par une diminution de proportion équivalente liée à la diminution du nombre de colis de déchets HA ;
- de 4 % pour le ^{79}Se ;
- d'un facteur 24 pour l'^{129}I.

Comme pour le premier cas d'architecture, l'augmentation des activités radiologiques liées à l'ajout des colis de déchets FA-VL est négligeable pour ces radionucléides d'intérêt.

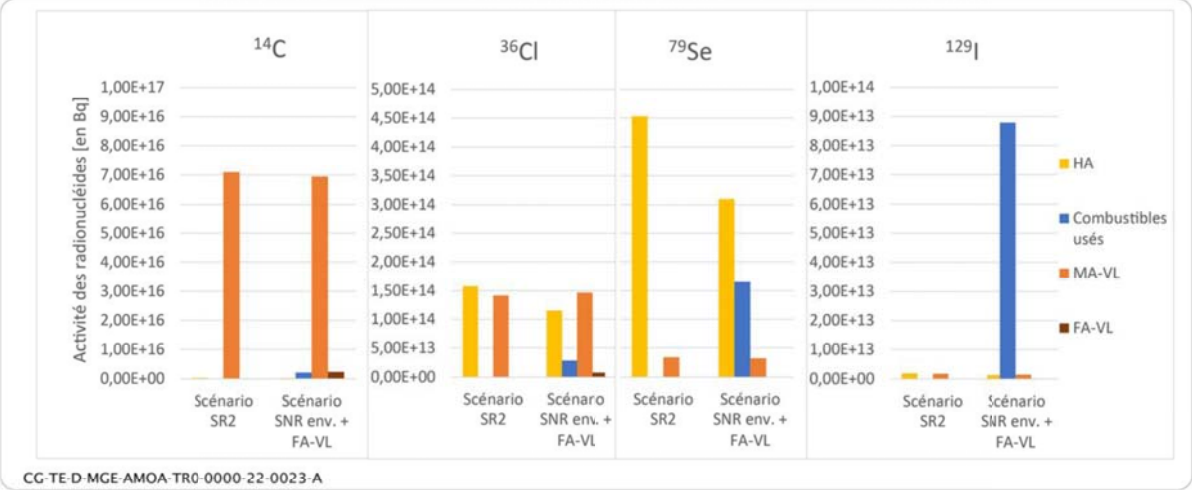


Figure 2-10 *Comparaison des activités du carbone 14, du chlore 36, du sélénium 79 et de l'iode 129 pour les colis de déchets HA, MA-VL, FA-VL et combustibles usés entre le scénario SR2 et le scénario SNR enveloppe + FA-VL*

2.2.3.1.2 Les inventaires radiologiques retenus pour le dimensionnement des équipements de radioprotection et pour les études de sûreté en phase de fonctionnement

La méthodologie de construction de l'inventaire radiologique des colis de l'inventaire de réserve pour le dimensionnement des équipements de radioprotection et pour les études de sûreté en phase de fonctionnement est identique à celle utilisée pour les colis de déchets de l'inventaire de référence (cf. Chapitre 3.1.2 du volume 3 du présent rapport). L'inventaire retenu est l'inventaire maximal par famille de colis, obtenu à partir des activités maximales pour chaque radionucléide, décru ou non selon l'état de production de la famille. Lorsque cet inventaire maximal n'est pas disponible, l'inventaire moyen sans prise en compte de décroissance est considéré[17].

Ces inventaires radiologiques, établis par famille de colis, servent de base à la définition des grandeurs caractéristiques des colis de déchets pour la phase de fonctionnement (cf. Chapitre 2.2.4 du présent volume), nécessaires pour le dimensionnement des structures/composants et équipements de radioprotection des installations de l'INB Cigéo (surface, liaisons surface-fond et souterraine). Ils servent également de données d'entrée pour l'évaluation des conséquences radiologiques associées aux différents scénarios de sûreté en phase de fonctionnement.

2.2.3.2 La démarche de construction et présentation des inventaires en toxiques chimiques des colis de l'inventaire de réserve

Comme pour les colis de déchets de l'inventaire de référence (cf. Chapitre 3.1 du volume 3 du présent rapport), les éléments retenus pour l'établissement des inventaires en toxiques chimiques sont : l'uranium, le plomb, le mercure, l'antimoine, le cadmium, le sélénium, l'arsenic, le nickel, le chrome, le bore, le béryllium, le radical CN et l'amiante. L'inventaire déclaré par le producteur dans les dossiers de connaissance, soit de manière distincte pour les différents composants du colis primaire (déchet, matrice, enveloppe primaire), soit de manière générale pour le colis primaire, correspond à la masse moyenne de chaque toxique chimique.

Le tableau 2-10 présente les masses des toxiques chimiques déclarés pour les colis primaires de l'ensemble de l'inventaire associé au **cas de l'allongement de la durée de fonctionnement du parc** (cf. Scénario SR1 tel que présenté au chapitre 2.1.2 du présent volume). Comme pour l'inventaire de

[17] Dans le cas spécifique des colis de combustibles usés, l'inventaire radiologique est décru aussi bien pour l'inventaire maximal que pour l'inventaire moyen et quel que soit l'état de production de la famille.

référence, l'antimoine et le sélénium sont présents en majorité dans les déchets HA (respectivement 81 % et 98 %) alors que le plomb, le mercure, l'arsenic, le nickel, le chrome, le bore, le béryllium et le radical CN sont apportés à plus de 88 % par les déchets MA-VL. Pour l'uranium et le cadmium, la répartition est proche de 30 % dans les déchets HA et 70 % dans les déchets MA-VL.

Tableau 2-10 *Masses des toxiques chimiques déclarées au titre du déchet pour le cas de l'allongement de la durée de fonctionnement du parc (scénario SR1)*

Élément ou radical toxique	U	Pb	Hg	Sb	Cd	Se	As	Ni	Cr	B	Be	CN-	Amiante
Unité	t	t	kg	t	t	t	kg	T	t	t	t	kg	kg
Masse	331	180	589	1,90	38,6	5,77	111	2 060	3 475	39,3	51,0	1,49	21,8
Fraction HA en %	33,3	0,0	0,0	80,6	29,9	98,3	11,1	2,4	2,5	0,2	0,0	0,0	0,0
Fraction MA-VL en %	66,7	100,0	100,0	19,4	70,1	1,7	88,9	97,6	97,5	99,8	100,0	100,0	100,0

La figure 2-11 montre l'augmentation de cet inventaire (SR1) par rapport à celui associé aux colis de déchets de l'inventaire de référence (SR2). L'ajout d'environ 17 % de colis de déchets HA (COG-200 et COG-800) et d'une portion négligeable de colis de déchets MA-VL (famille EDF-080) engendre une augmentation de la masse des substances toxiques chimiques les plus prépondérants de :

- 5 % pour l'uranium ;
- 16 % pour le cadmium ;
- autour de 2 % pour le nickel et le chrome ;
- 11 % pour le bore.

Les quantités de plomb et de béryllium sont identiques entre les deux inventaires.

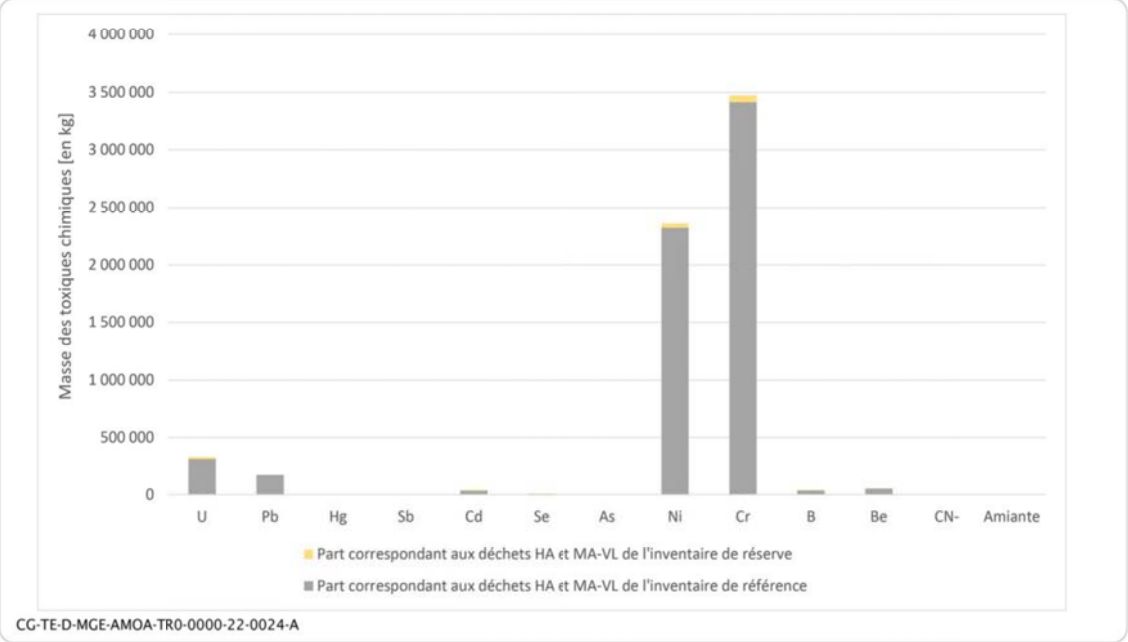


Figure 2-11 *Masses des toxiques chimiques déclarées au titre du déchet pour l'ensemble des colis primaires associés au scénario SR1*

Le tableau 2-11 présente les masses des toxiques chimiques déclarés pour les colis primaires de l'ensemble de l'inventaire associé au **cas de l'arrêt anticipé du retraitement de l'ensemble des combustibles usés concomitant à l'allongement de la durée de fonctionnement du parc** (cf. Scénario SNR enveloppe tel que présenté au chapitre 2.1.2 du présent volume). Les combustibles usés apportent principalement une quantité importante d'uranium (99 %) du fait de l'absence de retraitement. Pour les autres toxiques chimiques les proportions sont équivalentes à celles des déchets de l'inventaire de référence avec une répartition plus ou moins équitable entre les déchets HA et les combustibles usés pour les éléments initialement présents dans les déchets HA de l'inventaire de référence.

Tableau 2-11 *Masses des toxiques chimiques déclarées au titre du déchet pour le cas de l'arrêt anticipé du retraitement de l'ensemble des combustibles usés concomitant à l'allongement de la durée de fonctionnement du parc (scénario SNR enveloppe)*

Élément ou radical toxique	U	Pb	Hg	Sb	Cd	Se	As	Ni	Cr	B	Be	CN-	Amiante
Unité	t	t	kg	t	t	t	kg	T	t	t	t	kg	kg
Masse	28 016	151	589	2,07	37,6	5,31	110	2 308	3 332	39,6	51,1	1,49	21,8
Fraction CU en %	99,0	0,6	0,0	46,1	11,6	37,1	4,1	10,9	9,2	0,8	0,2	0,0	0,0
Fraction HA en %	0,2	0,0	0,0	39,2	16,3	61,1	6,3	2,1	2,0	0,2	0,0	0,0	0,0
Fraction MA-VL en %	0,8	99,3	100,0	14,8	72,1	1,3	89,6	87,1	88,7	99,0	99,8	100,0	100,0

La figure 2-12 montre l'augmentation de cet inventaire (SNR enveloppe) par rapport à celui associé aux colis de déchets de l'inventaire de référence (SR2). L'ajout des colis de combustibles usés complété par

le retrait des colis de déchets HA et MA-VL correspondant aux combustibles qui n'auraient pas été retraités engendre pour les toxiques chimiques les plus prépondérants :

- une augmentation de leur masse :
  - ✓ d'un facteur 88 pour l'uranium ;
  - ✓ de 13 % pour le cadmium ;
  - ✓ de 12 % pour le bore ;
- une diminution de leur masse :
  - ✓ de 16 % pour le plomb (essentiellement lié à la diminution de la quantité de déchets MA-VL) ;
  - ✓ d'environ 2 % pour le nickel et le chrome (diminution de 11 % pour les déchets HA et MA-VL, compensée en quasi-totalité par la quantité apportée par les combustibles usés).

Comme précédemment, les quantités de béryllium sont identiques entre les deux inventaires.

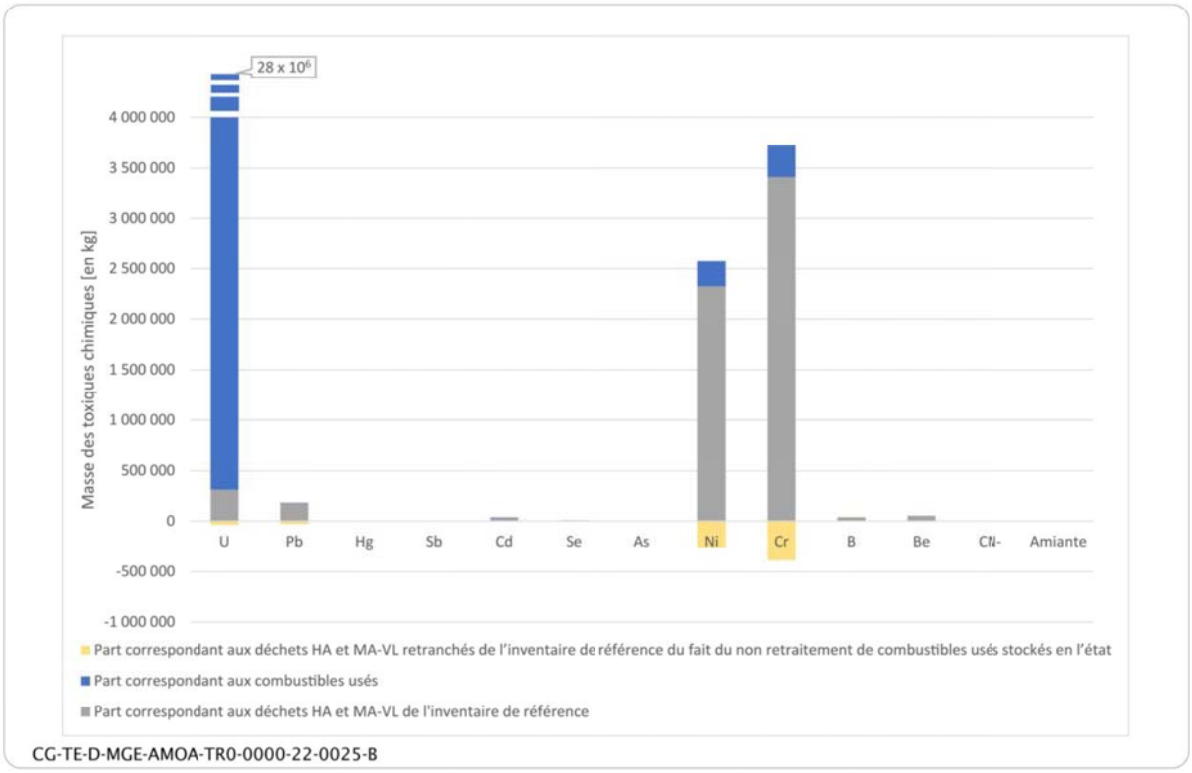


Figure 2-12 *Masses des toxiques chimiques déclarées au titre du déchet pour l'ensemble des colis primaires associés au scénario SNR enveloppe*

Le tableau 2-12 présente les masses des toxiques chimiques déclarés pour les colis primaires de l'inventaire associé au **cas du stockage de colis de déchets FA-VL** (cf. Incertitudes sur les nouvelles filières tel que présenté au chapitre 2.1.3 du présent volume). Ces colis apportent majoritairement du mercure et de l'arsenic à l'inventaire total en toxiques chimiques. Ils contribuent à plus de 20 % de l'inventaire total de ces deux éléments pour l'ensemble des déchets quel que soit le scénario (SR2, SR1 ou SNR enveloppe) auquel est ajouté le stockage des colis de déchets FA-VL.

Tableau 2-12 *Masses des toxiques chimiques déclarées au titre du déchet pour le cas du stockage de colis de déchets FA-VL*

Élément ou radical toxique	U	Pb	Hg	Sb	Cd	Se	As	Ni	Cr	B	Be	CN-	Amiante
Unité	t	t	kg	kg	kg	kg	kg	T	t	t	kg	kg	kg
Masse	15,1	5,59	156	192	29,1	80,5	38,9	12,9	1,32	1,23	14,4	0,00	0,00

La figure 2-13 compare cet inventaire avec celui associé aux colis de déchets MA-VL de l'inventaire de référence (SR2). L'ajout de près de 50 000 colis de déchets FA-VL engendre ainsi une augmentation de la masse des toxiques chimiques par rapport aux déchets MA-VL de :

- respectivement 27 % et 40 % pour le mercure et l'arsenic, toxiques chimiques en très faible proportion relativement aux autres éléments ;
- 0 % à 3 % pour les autres toxiques chimiques contenus majoritairement dans cette typologie de déchets (Pb, Cd, Ni, Cr, B, Be, CN- et Amiante) ;
- 52 % pour l'antimoine, 81 % pour le sélénium et 7 % pour l'uranium qui sont des toxiques chimiques faiblement (voire très faiblement) présents dans cette typologie de déchets par rapport aux déchets HA ou aux CU.

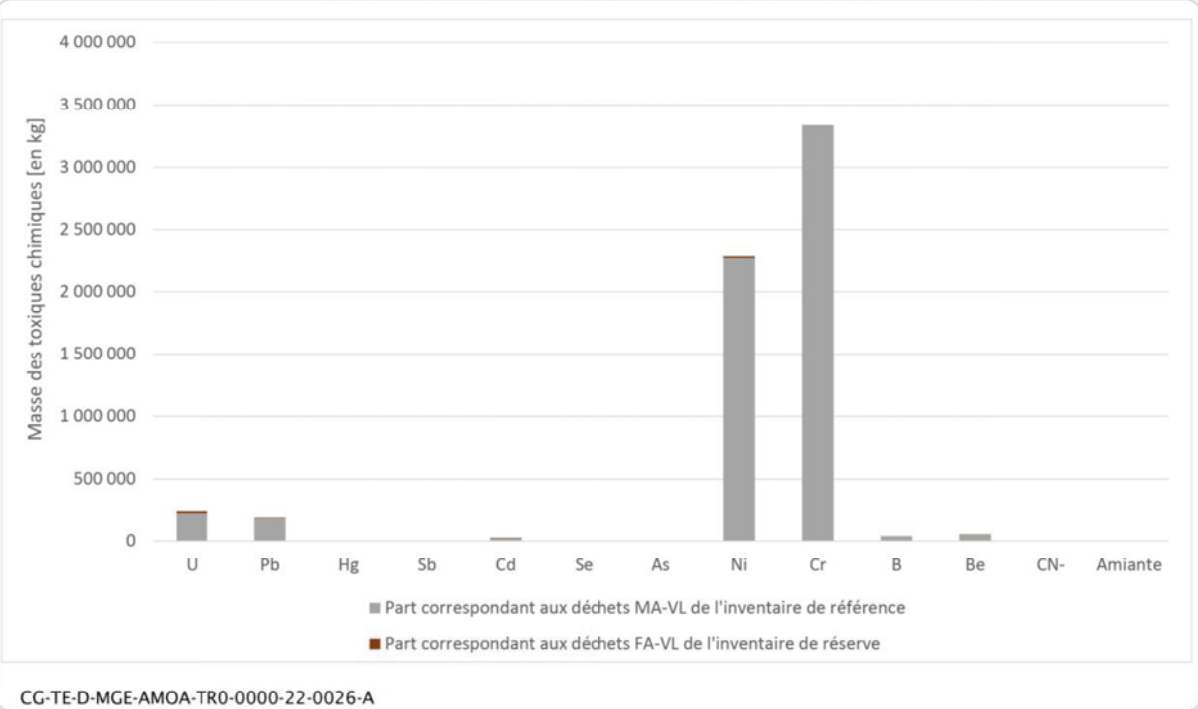


Figure 2-13 *Masses des toxiques chimiques déclarées au titre du déchet pour les colis primaires de type MA-VL et FA-VL associés au stockage des colis de déchets FA-VL*

2.2.4 Les grandeurs caractéristiques des colis de l'inventaire de réserve

À l'instar des familles de colis de déchets de l'inventaire de référence, les familles de colis de l'inventaire de réserve présentent également une grande variabilité liée à la diversité des déchets considérés et des modes de conditionnement. Des grandeurs caractéristiques spécifiques à ces colis sont établies en suivant la même démarche que pour les colis de l'inventaire de référence (cf. Chapitre 4 du volume 3 du présent rapport).

Les grandeurs caractéristiques concernent principalement la phase de fonctionnement et, dans une moindre mesure, la phase long terme après-fermeture vis-à-vis des fonctions de sûreté suivantes :

- pour la phase de fonctionnement :
  - ✓ le confinement des substances radioactives ;
  - ✓ la protection des personnes et de l'environnement contre les rayonnements ionisants ;
  - ✓ la maîtrise des réactions nucléaires en chaîne ;
  - ✓ l'évacuation de la puissance thermique issue des substances radioactives et des réactions nucléaires ;
  - ✓ la maîtrise des gaz formés par radiolyse ou corrosion ;
- pour la phase long terme après-fermeture :
  - ✓ limiter le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets jusqu'à la biosphère.

Les colis de déchets HA et MA-VL induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc et retenus dans l'inventaire de réserve étant identiques à ceux de l'inventaire de référence, les grandeurs caractéristiques déterminées pour ces familles sont reprises. Elles sont détaillées pour chacun des risques relatifs aux fonctions de sûreté énoncées ci-avant dans le chapitre 4.1 du volume 3 du présent rapport.

En raison de caractéristiques fondamentalement différentes, les combustibles usés présentent des grandeurs caractéristiques propres, synthétisées succinctement au chapitre 2.2.4.1 du présent volume en ce qui concerne la phase de fonctionnement et au chapitre 2.2.4.3 du présent volume en ce qui concerne la phase long terme après-fermeture.

Les caractéristiques des colis de déchets FA-VL étant légèrement différentes de celles des colis de déchets MA-VL présents dans l'inventaire de référence, la démarche retenue consiste à établir les grandeurs caractéristiques par analogie avec celles définies pour les colis de déchets de l'inventaire de référence (cf. Chapitre 4.1 du volume 3 du présent rapport). Lorsque cela est nécessaire, des grandeurs caractéristiques spécifiques sont établies. Le chapitre 2.2.4.2 du présent volume présente une synthèse de l'ensemble des grandeurs caractéristiques des colis de déchets FA-VL relatives à la phase de fonctionnement et le chapitre 2.2.4.3 du présent volume de celles relatives à la phase long terme après-fermeture.

La description détaillée de l'ensemble des grandeurs caractéristiques des colis de l'inventaire de réserve se trouve dans le document qui présente les « Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve » (16).

2.2.4.1 Les grandeurs caractéristiques des colis de combustibles usés retenues pour la phase de fonctionnement de l'INB

2.2.4.1.1 La protection contre l'exposition aux rayonnements ionisants

Les grandeurs caractéristiques vis-à-vis du risque d'exposition externe aux rayonnements ionisants servent de données d'entrées pour le dimensionnement des protections radiologiques (murs, portes, hublots, façades d'accostage et hottes). Leur identification à l'égard des colis de combustibles usés repose sur la même méthode que pour les colis de déchets HA. Pour les colis de combustibles usés, elles sont définies à partir des inventaires radiologiques enveloppes des colis présentant la plus forte intensité d'émission gamma totale

2.2.4.1.2 Le confinement des substances radioactives

La grandeur caractéristique retenue vis-à-vis du risque de dispersion des substances radioactives est exprimée en LDCA.m^3.h^{-1} (en fonctionnement normal et dégradé) ou en LDCA.m^3 (en situations incidentelles et accidentelles)[18]. En suivant la même méthode que celle retenue pour les colis de déchets HA, pour chacune des situations potentielles de contamination identifiées (normales et incidentelles) elles reposent sur :

- en fonctionnement normal, c'est-à-dire lorsque les déchets sont toujours contenus à l'intérieur d'au moins une barrière de confinement (colis primaire et/ou colis de stockage), uniquement la remise en suspension de la contamination surfacique labile externe. Un taux de remise en suspension horaire est alors pris en compte (à 10^{-5} h^{-1}) pour modéliser le léchage des surfaces potentiellement contaminées des colis par l'air de la ventilation ;
- en cas de choc, chute, collision et séisme, la remise en suspension de la contamination surfacique labile externe, voire, en fonction du niveau de sollicitation mécanique, la remise en suspension d'une partie de l'activité présente au sein même du ou des colis ;
- en cas d'incendie, la remise en suspension de la contamination surfacique labile du colis, voire, en fonction de la sollicitation thermique, la remise en suspension d'une partie de l'activité présente au sein même du colis.

  À ce stade des études, étant donné la température à laquelle est soumise le combustible en réacteur, il est considéré que les scénarios d'incendie ne sont pas susceptibles de mobiliser le contenu interne des colis primaires.

Le tableau 2-13, le tableau 2-14 et le tableau 2-15 présentent les valeurs maximales obtenues pour les combustibles du CEA et celles obtenues pour les combustibles usés d'EDF, selon les différentes situations considérées, tirées du document en référence « Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve » (16).

[18] LDCA = limite dérivée de concentration dans l'air.

Tableau 2-13 *Évaluation des grandeurs caractéristiques maximales relatives à une mobilisation de la contamination surfacique labile en fonctionnement normal et dégradé pour les combustibles usés d'EDF et du CEA*

Mobilisation de la contamination surfacique labile des colis			
Types de colis de stockage	**Familles**	**Grandeurs caractéristiques (Nb LDCA.m³.h⁻¹)**	
		CP	**CS**
Fonctionnement normal (léchage des surfaces potentiellement contaminées des colis par l'air de la ventilation)			
CS CU 19	EDF-2010, EDF-2030, EDF-2040, EDF-2050	$8{,}23 \times 10^{-1}$	**1,40**
CS CU 2	EDF-2300	**1,49**	$4{,}57 \times 10^{-1}$
CS CU 5	CEA-2100, CEA-2230	**1,98**	$5{,}94 \times 10^{-1}$
CS CU 11 à 16	CEA-2300	*Données en diffusion restreinte*[19]	**$6{,}20 \times 10^{-1}$**

[19] D'ordre de grandeur équivalente à la valeur maximale obtenue pour les autres colis de combustibles du CEA.

Tableau 2-14 *Évaluation des grandeurs caractéristiques maximales relatives à une mobilisation de la contamination surfacique labile en fonctionnement normal et dégradé pour les combustibles usés d'EDF et du CEA*

Mobilisation de la contamination surfacique labile des colis			
Types de colis de stockage	**Familles**	**Grandeurs caractéristiques (Nb LDCA.m³)**	
		CP	**CS**
En cas de chute, choc ou collision inférieure à la hauteur de qualification			
CS CU 17	EDF-2200, EDF-2210, EDF-2220, EDF-2230	$5{,}44 \times 10^{1}$	**$9{,}18 \times 10^{1}$**
CS CU 19	EDF-2010, EDF-2030, EDF-2040, EDF-2050	**$8{,}23 \times 10^{1}$**	$1{,}40 \times 10^{2}$
CS CU 5	CEA-2100, CEA-2230	**$1{,}98 \times 10^{2}$**	$5{,}94 \times 10^{1}$
CS CU 11 à 16	CEA-2300	*Données en diffusion restreinte**	**$6{,}20 \times 10^{1}$**
En cas d'incendie			
CS CU 19	EDF-2010, EDF-2030, EDF-2040, EDF-2050	$5{,}78 \times 10^{2}$	**$9{,}84 \times 10^{2}$**
CS CU 1	EDF-2300	**$4{,}15 \times 10^{1}$**	$3{,}19 \times 10^{2}$
CS CU 7	CEA-2210, CEA-2220, CEA-2230, CEA-2270, CEA-2400, CEA-2500, CEA-2600, CEA-2700	$8{,}62 \times 10^{2}$	$4{,}2 \times 10^{2}$
CS CU 11 à 16	CEA-2300	*Données en diffusion restreinte**	**$4{,}36 \times 10^{2}$**

** D'ordre de grandeur équivalente à la valeur maximale obtenue pour les autres colis de combustibles du CEA*

Tableau 2-15 *Évaluation des grandeurs caractéristiques relatives à une mobilisation du contenu radioactif interne solide du colis primaire en cas de chute excédant sa hauteur de qualification*

Mobilisation du contenu radioactif interne solide du colis primaire				
En cas de chute, choc ou collision excédant sa hauteur de qualification				
CS CU 7	CEA-2210, CEA-2220, CEA-2230, CEA-2270, CEA-2400, CEA-2500, CEA-2600, CEA-2700	4,3	CEA-2600	**$1{,}86 \times 10^{11}$**
CS CU 18	EDF-2010, EDF-2030, EDF-2040, EDF-2050	0,4	EDF-2010	**$2{,}96 \times 10^{10}$**
CS CU 19				

2.2.4.1.3 La sûreté-criticité

Les grandeurs caractéristiques vis-à-vis du risque de criticité regroupent plusieurs paramètres :

- la typologie des combustibles (géométrie des éléments fissiles et non-fissiles, matériaux non fissiles) ;
- la nature des matières fissiles (enrichissement, teneur, densité, forme physico-chimique) ;
- la masse de matière fissile.

Des colis de combustibles enveloppes sont déterminés par familles et les valeurs des paramètres retenus permettent de couvrir l'ensemble des colis de la famille considérée vis-à-vis du risque de criticité.

2.2.4.1.4 L'évacuation de la puissance thermique des colis de déchets

Les grandeurs caractéristiques retenues vis-à-vis du risque lié à l'évacuation de la puissance thermique des colis primaires sont les valeurs de puissance thermique pénalisantes pour chaque type de colis de stockage. Cette valeur est déterminée, pour chacune des familles de colis, à partir des valeurs de puissance thermique moyenne à la date de mise en stockage correspondante telles que présentées dans le tableau 2-16.

Tableau 2-16 *Puissances thermiques moyennes par type de colis de stockage et famille de colis associées*

Types de colis de stockage	Familles	Gamme de puissance thermique moyenne par CP à la date de mise en stockage (W)
CS CU 1, CS CU 2	EDF-2300	<200 W
CS CU 3 à CS CU 16, CS CU 24	CEA-2000, CEA-2100, CEA-2210, CEA-2220, CEA-2230, CEA-2240, CEA-2250, CEA-2260, CEA-2270, CEA-2300, CEA-2350, CEA-2400, CEA-2500, CEA-2600, CEA-2700	
CS CU 17	EDF-2200, EDF-2210, EDF-2220, EDF-2230	200 à 500 W
CS CU 18, CS CU 19	EDF-2010, EDF-2030, EDF-2040, EDF-2050	
CS CU 20, CS CU 21	EDF-2000, EDF-2020	
	EDF-2100, EDF-2110	500 à 1 000 W
CS CU 22, CS CU 23	EDF-2120	
	EDF-2130	1 000 à 1 150 W[20]

2.2.4.1.5 L'évacuation des gaz produits par radiolyse pour les déchets afférents

Au stade actuel des études et de la connaissance, les données disponibles permettent d'identifier que certains colis de combustibles usés du CEA peuvent présenter un terme source hydrogène, notamment en lien avec la présence d'araldite. Cependant, la conception des conteneurs primaires est à ce stade prévue étanche au gaz. Par conséquent, il n'est pas retenu de dégagement d'hydrogène par les colis primaires.

[20] Cette valeur est à rapporter à la longueur du colis primaire qui est plus élevée dans le cas de ces familles de combustibles usés que dans le cas des colis primaires HA (pour lesquels une puissance thermique de 500 W est retenue).

2.2.4.2 Les grandeurs caractéristiques des colis de déchets FA-VL retenues pour la phase de fonctionnement de l'INB

2.2.4.2.1 La protection contre l'exposition aux rayonnements ionisants

Pour déterminer les grandeurs caractéristiques nécessaires au dimensionnement des protections radiologiques vis-à-vis de l'exposition externe, la famille de colis présentant les inventaires maximaux est retenue pour chacun des modes de stockage de colis FA-VL. Les familles de colis à considérer sont les suivantes :

- familles COG-3010 et COG-3020 pour les déchets UNGG de La Hague en conteneurs CS 3 ;
- famille CEA-6010 pour les colis de déchets bitumés en conteneurs CS 4.1 ;
- famille AND-7020 pour les déchets collectés par l'Andra en conteneurs CS 5 ;
- famille CEA-3070 pour les chemises et empilements de graphite du CEA en stockage direct CBFK-B ;
- famille EDF-3070 pour les chemises et empilements de graphite d'EDF en stockage direct CS4 graphite ;
- famille COG-3040 pour les autres déchets UNGG de La Hague en stockage direct CBF-C2K ou en conteneurs CS 2.1.

Les activités totales et la sommes des activités des principaux contributeurs (DED gamma et neutron) de l'ensemble de ces familles de colis de déchets FA-VL sont inférieures aux activités de l'ensemble des familles de colis de déchets MA-VL retenus pour le dimensionnement des protections radiologiques dans le cas du stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence.

2.2.4.2.2 Le confinement des substances radioactives

Comme vu précédemment, les grandeurs caractéristiques s'appuient sur la remise en suspension de la contamination surfacique labile externe et dans le cas de certaines situations (cas du déconfinement concomitant à un choc, une collision ou un incendie), sur la remise en suspension d'une partie de l'activité présente au sein même du colis. La comparaison des caractéristiques des colis de déchets FA-VL avec les grandeurs caractéristiques des colis de déchets MA-VL montre que pour toutes les situations considérées, les activités mobilisables des colis de déchets FA-VL sont plus faibles que celles des colis de déchets MA-VL. Concernant le conteneur CBFK-B non présent dans l'inventaire de référence, sa surface externe étant inférieure à la surface enveloppe des conteneurs des colis de déchets MA-VL, les activités mobilisées sont couvertes. En cas de séisme, l'activité mobilisable des colis de déchets FA-VL qui s'ajoute à celle des colis de déchets MA-VL conduit à un impact qui reste très limité (dose efficace enveloppe à 50 ans pour un adulte inférieure au nanosievert).

2.2.4.2.3 La sûreté-criticité

La grandeur caractéristique retenue pour les colis de déchets FA-VL vis-à-vis du risque de criticité est la masse maximale de matière fissile mesurée ou estimée par les producteurs. Les conteneurs primaires, et donc leur géométrie, sont les mêmes que pour les colis de déchets MA-VL hormis pour le CBF-C2K pour lequel la géométrie ne remet pas en cause les choix de modèle retenus. Les familles de colis de déchets de graphite (chemises et empilement conditionnés en CBFK-B et CS4 graphite) et les familles de colis de déchets collectés par l'Andra ne comportent que des traces de matière fissile. En ce qui concerne les autres familles de colis, les masses restent inférieures (voire très inférieure) à celles des familles enveloppes de colis de déchets MA-VL.

2.2.4.2.4 L'évacuation de la puissance thermique des colis de déchets

Les puissances thermiques des colis de déchets FA-VL par colis primaire, calculées pour chaque famille de colis d'après les inventaires radiologiques moyens par colis primaire à la date de 2030, sont comprises entre environ 1×10^{-2} et $3{,}6 \times 10^{-1}$ W par colis primaire, valeurs nettement inférieures à celles des colis de déchets MA-VL (plus d'un ordre de grandeur d'écart) les plus exothermiques, toute proportion gardée.

Ainsi, la puissance thermique associée aux alvéoles de stockage des colis de déchets FA-VL, les valeurs obtenues sont inférieures d'environ trois ordres de grandeur avec la puissance thermique associée aux alvéoles de stockage des colis de déchets MA-VL les plus exothermiques.

2.2.4.2.5 L'évacuation des gaz produits par radiolyse

Pour les colis de déchets FA-VL, le débit de production d'hydrogène est égal à 10 $NL.an^{-1}$ ou 40 $NL.an^{-1}$ par colis de stockage selon les familles de colis, cette dernière valeur est couverte par les valeurs retenues pour les colis de déchets MA-VL.

2.2.4.3 Les grandeurs caractéristiques pour la phase long terme après la fermeture définitive de l'installation de stockage

Conformément aux principes présentés dans le chapitre 4 du volume 3 du présent du rapport de sûreté, les grandeurs caractéristiques considérées pour la phase long terme après-fermeture sont celles à l'origine de dispositions de conception. Elles sont rappelées ci-après :

- la puissance thermique des déchets : celle-ci peut induire pendant une certaine période, une perturbation thermique du Callovo-Oxfordien. Elle est à l'origine de dispositions pour en limiter les conséquences sur les argilites et pour la maîtrise du comportement des radionucléides ;
- la présence de substances dans certains déchets MA-VL et FA-VL, en particulier des substances organiques complexantes et des sels : elles sont susceptibles d'induire des perturbations chimiques modifiant les propriétés de transport et rétention (solubilité et sorption) du Callovo-Oxfordien ;
- la présence d'isotopes fissiles : elle est susceptible en cas d'excursion critique de modifier diverses caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien.

2.2.4.3.1 La puissance thermique des colis de déchets HA et des combustibles usés

La puissance thermique des colis de déchets peut modifier diverses caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien. Pour maîtriser les conséquences de la perturbation engendrée, les dispositions retenues selon les caractéristiques affectées pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence sont reconduites dans le cas du stockage des colis de l'inventaire de réserve, quel que soit le cas d'architecture considéré (SR1 + FA-VL ou SNR enveloppe + FA-VL). Explicitées dans le chapitre 4 du volume 3 du présent rapport, elles sont rappelées ci-après :

- température inférieure à 70 °C dans le Callovo-Oxfordien afin de maîtriser le comportement des radionucléides ;
- température maximale des argilites strictement inférieure à 100 °C (pour tenir compte des incertitudes, une marge de 10 °C est adoptée pour le dimensionnement. Une flexibilité de la marge est appliquée dans le cas de certains combustibles usés fortement exothermiques sous condition de justification) ;
- dimensionnement thermo-hydro-mécanique (THM) de la zone de stockage HA[21] de sorte à limiter la température des argilites et la contrainte effective maximale de Terzaghi vu par la roche hôte, qui conduit à réduire la densité de charge thermique par l'application des dispositions suivantes :
  - ✓ espacement des alvéoles entre eux ;
  - ✓ espacement des colis stockés dans les alvéoles.

Les grandeurs caractéristiques retenues pour le dimensionnement THM de la zone de stockage HA correspond aux puissances moyennes des colis HA1/HA2 pour le quartier de stockage HA et des colis de combustibles usés pour le quartier associé. Dans le cas d'architecture considérant le stockage des combustibles usés, la grande variabilité de thermicité des combustibles usés se traduit par un agencement des alvéoles plus ou moins dense selon les caractéristiques thermiques ces colis.

[21] La zone de stockage HA accueille le quartier de stockage HA et celui des combustibles usés quand ils sont à considérer.

2.2.4.3.2 Les substances dans les déchets MA-VL et FA-VL

Certaines substances associées aux déchets peuvent être à l'origine de perturbations de la couche du Callovo-Oxfordien et modifier ses propriétés de transport et rétention (solubilité et sorption). Les principales perturbations chimiques induites par les déchets FA-VL sont identiques à celles induites par les déchets MA-VL. Elles sont rappelées ci-après :

- la perturbation organique due à la dégradation des déchets MA-VL riches en composés organiques susceptibles de générer des espèces complexantes ;
- la perturbation saline due aux déchets MA-VL salins.

Les principes permettant de limiter ces perturbations tels que détaillés au chapitre 4 du volume 3 du présent rapport sont reconduits pour le dimensionnement du quartier de stockage FA-VL. Les règles de co-stockage définies pour les déchets MA-VL ont été appliquées aux déchets de même nature physico-chimique de l'inventaire FA-VL. Dans le cas particulier des déchets de graphite, nature physicochimique non présente dans les déchets de l'inventaire de référence, aucun co-stockage n'a été retenu.

Le tableau en annexe 1 du présent volume donne la répartition des familles de colis primaires par catégorie.

2.2.4.3.3 Les isotopes fissiles

Les isotopes fissiles des colis de déchets peuvent modifier diverses caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien en cas d'excursion critique. Pour maîtriser les conséquences de la perturbation engendrée, il est retenu d'exclure l'occurrence d'une excursion critique. À l'instar de l'étude de ce risque en phase de fonctionnement, la masse maximale de matière fissile mesurée ou estimée par les producteurs est la grandeur caractéristique retenue pour vérifier la sous-criticité du système de stockage à long terme.

3

La conception de l'INB associée au stockage des colis de l'inventaire de réserve

3.1 La démarche retenue pour vérifier que la conception de l'INB préserve la possibilité technique du stockage des colis de l'inventaire de réserve 50

3.2 L'identification des parties de l'INB concernées par l'adaptabilité 51

3.3 Les dispositions pour la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve dans l'INB - cas du stockage des colis de déchets HA et MA-VL induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc (SR1) 57

3.4 Les dispositions pour la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve dans l'INB - cas du stockage des colis de combustibles usés (SNR enveloppe) 59

3.5 La disposition pour la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve dans l'INB - cas du stockage des colis de déchets FA-VL 67

3.1 La démarche retenue pour vérifier que la conception de l'INB préserve la possibilité technique du stockage des colis de l'inventaire de réserve

La conception des installations et ouvrages de l'INB Cigéo retenue pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence est présentée dans le volume 5 du présent rapport.

Les études de conception réalisées au titre de l'adaptabilité de l'INB permettent de justifier, conformément à l'annexe C à la lettre ASN du 12 janvier 2018 (3), que *« la conception retenue pour l'installation de stockage dont la création est prévue préserve la possibilité technique de l'accueil des* [colis de l'inventaire de réserve] *»*. À cet égard, *« les modifications éventuelles à apporter aux installations « support » (descenderies, galeries d'accès, installations de surface, ventilation...) »*, ou « *dispositions conservatoires* », sont identifiées pour permettre, le cas échéant, le stockage de ces colis. C'est l'objet de la suite de ce chapitre avec, d'une part, le chapitre 3.2 du présent volume qui identifie les bâtiments et ouvrages de la tranche 1 (construction initiale) et des tranches ultérieures de l'INB qui seraient concernés par l'adaptabilité et, d'autre part, le chapitre 3.3 du présent volume qui traite des dispositions techniques en soi.

La démarche suivie pour les études de conception réalisées au titre de l'adaptabilité repose sur les principes retenus pour le dimensionnement de l'INB prévue pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence, présentés dans le volume 2 du présent rapport. Elle considère l'ensemble des opérations de manutention des colis, depuis leur réception en surface jusqu'à leur mise en alvéole de stockage en souterrain (déchargement, contrôles, réalisation des colis de stockage et transfert *via* la descenderie colis puis les galeries souterraines). Les études préliminaires de conception conduites au stade d'esquisse ne requièrent pas la recherche d'optimisations pour répondre à l'objectif des études d'adaptabilité fixé par l'ASN dans l'annexe C de la lettre du 12 janvier 2018 (3).

En outre, elles tiennent compte de la différence d'enjeux entre la réalisation de la tranche 1 (construction initiale) et celle des tranches ultérieures. Pour rappel du volume 5 du présent rapport, l'INB Cigéo telle que prévue est composée :

- des installations de surface réparties selon les deux zones distinctes suivantes :
  - ✓ la zone descenderie qui permet : la réception des colis primaires, le cas échéant, la mise en colis de stockage puis la mise en hotte en vue de leur transfert vers les différentes zones de stockage de l'installation souterraine *via* la descenderie « colis » ;
  - ✓ la zone puits qui permet : le support à l'exploitation (puits de ventilation...), aux travaux souterrains et l'accès du personnel à l'installation souterraine ;
- d'une installation souterraine qui comprend :
  - ✓ les liaisons surface-fond : puits et descenderies ;
  - ✓ deux zones de soutien logistique (ZSL) : ZSL exploitation et ZSL travaux ;
  - ✓ deux zones de stockage (zone de stockage HA et zone de stockage MA-VL) subdivisées en plusieurs quartiers de stockage selon les typologies de colis considérées : quartier pilote HA quartier de stockage HA puis quartier de stockage de combustibles usés et quartier de stockage MA-VL puis quartier de stockage FA-VL.

Les installations et différents équipements et composants de l'INB seront construits en tranches successives. La première tranche T1 correspond à la construction initiale de l'INB. Les autres tranches dites « tranches ultérieures » (TU) seront réalisées, selon le processus présenté au chapitre 1 du volume 5 du présent rapport et, par ailleurs, par la pièce 16 « Plan directeur de l'exploitation » (17). Cette construction en plusieurs tranches répond à l'objectif de progressivité du développement de l'INB.

» RÉSULTATS DES ÉTUDES DE CONCEPTION RÉALISÉES AU TITRE DE L'ADAPTABILITÉ

Les études de conception réalisées au titre de l'adaptabilité tiennent compte de la différence d'enjeu entre la construction initiale (T1) et les tranches ultérieures (TU). Ainsi, pour répondre à l'objectif des études d'adaptabilité présenté dans l'annexe C à la lettre ASN du 12 janvier 2018 (3), les résultats des études de conception apportent :

- les éléments permettant de valider la faisabilité de l'accueil potentiel des colis de l'inventaire de réserve ; ces éléments sont issus des analyses qui couvrent l'ensemble des phases de développement de l'INB ;
- les modifications éventuelles intégrées aux installations dès la construction initiale (ou tranche T1), appelées « dispositions conservatoires » ;
- les modifications à apporter aux installations lors du déploiement des tranches ultérieures (TU). Ces modifications, sans préempter la solution retenue *in fine*, seront étudiées et intégrées dans le cadre du développement progressif de l'INB, dont certaines sont décrites dans le chapitre 3.3 du présent volume au titre de la démonstration de la faisabilité.

Ces études pourront être enrichies ultérieurement des avancées scientifiques et technologiques ainsi que des optimisations et améliorations possibles, au regard notamment du retour d'expérience au fur et à mesure du développement progressif de l'INB.

3.2 L'identification des parties de l'INB concernées par l'adaptabilité

Afin de bien mesurer les enjeux qui s'imposent à chaque élément de l'INB en lien avec la temporalité de sa construction, les ouvrages ou composants de l'INB concernés par la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve sont présentés dans les deux chapitres suivants, pour chacune des parties de l'installation (surface ou souterrain), en distinguant ceux construits lors de la tranche T1 de ceux construits lors des tranches TU.

3.2.1 Les installations de surface

En cas de prise en charge des colis de l'inventaire de réserve, seuls certains bâtiments de la zone descenderie participeraient à la gestion et au transfert de ces colis selon le type de déchet considéré et la chronique de livraison associée. Vis-à-vis des nouvelles typologies de colis présentes dans l'inventaire de réserve, il est retenu que leur gestion s'effectue au sein des bâtiments et ouvrages prévus pour la prise en charge des colis de déchets de l'inventaire de référence sous réserve d'éventuelles adaptations ou modifications (identifiées au sein du chapitre 3.3 suivant du présent volume).

3.2.1.1 Les bâtiments et ouvrages de surface prévus en tranche T1

Les bâtiments et ouvrages de surface réalisés pour la tranche T1 de construction de l'INB sont présentés par la figure 3-1.

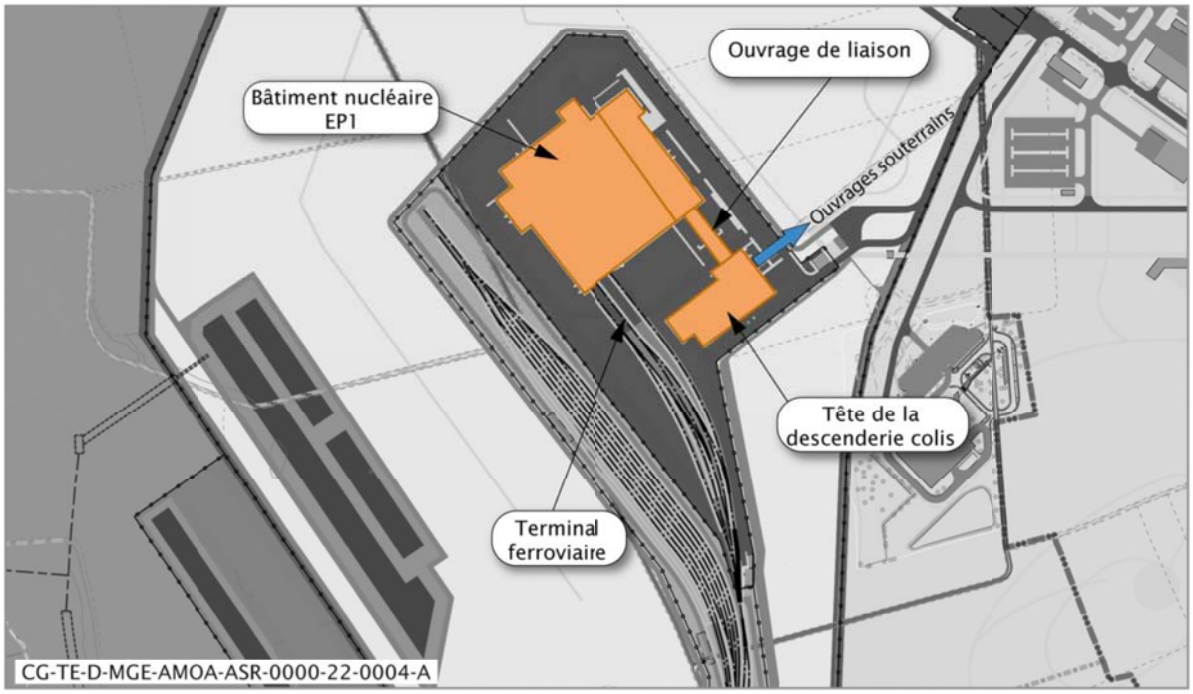


Figure 3-1 Installations de surface de la zone descenderie de l'INB - Tranche T1

Même si les caractéristiques de certains colis de déchets FA-VL diffèrent des celles des MA-VL, en raison de caractéristiques voisines entre ces colis (cf. Chapitre 2.2 du présent volume), le bâtiment nucléaire EP1 conçu pour prendre en charge les colis de déchets MA-VL peut recevoir également les colis de déchets FA-VL.

La tête de descenderie est également concernée par le transfert de l'ensemble des colis avant leur transfert *via* la descenderie et donc par ceux de l'inventaire de réserve. Une attention particulière est portée sur les dimensions géométriques des colis de combustibles usés, supérieures à toutes celles des autres colis.

Le tableau 3-1 présente vis-à-vis des bâtiments et ouvrages prévus de la T1 les points d'attention liés aux spécificités des colis de l'inventaire de réserve (caractéristiques intrinsèques des colis, nombre et chroniques) pour chacune des typologies de colis. Toutefois, l'ouvrage de liaison et le terminal ferroviaire, n'étant pas impactés par la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve, ils ne sont pas mentionnés par le tableau.

Tableau 3-1 *Bâtiments et ouvrages prévus en tranche T1 concernés par la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve et points d'attention associés*

Type de colis de déchets	Bâtiment nucléaire EP1	Tête de la descenderie
HA supplémentaires (SR1)	-	-
MA-VL supplémentaires (SR1)	Nombre et chronique : prolongation de la durée de fonctionnement de dix ans.	-
CU (SNR enveloppe)	-	Dimensions géométriques (longueur de colis) : adaptation de la conception.
FA-VL	Caractéristiques de certains colis de stockage (absence de passage de fourches et masse) : adaptation d'équipements. Nombre : prolongation éventuelle de la durée de fonctionnement.	-

3.2.1.2 Les bâtiments et ouvrages de surface prévus pour les tranches TU

Les bâtiments et ouvrages de surface réalisés pour les tranches TU de construction de l'INB sont présentés par la Figure 3-2.

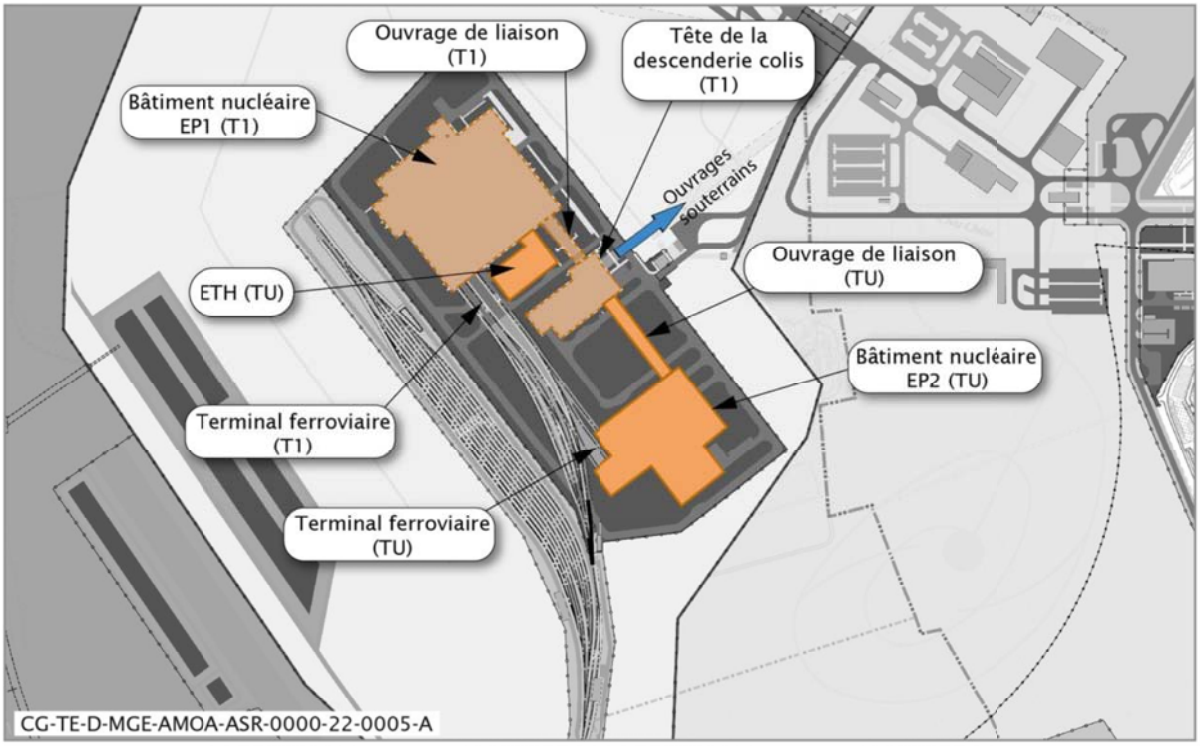


Figure 3-2 *Installations de surface de la zone descenderie de l'INB - Tranche TU*

En raison de caractéristiques voisines entre les colis de déchets MA-VL et les colis de déchets FA-VL, l'ouvrage de déchargement des emballages à déchargement horizontal (ET-H)[22], conçu pour prendre en charge des colis de déchets MA-VL, peut également recevoir les colis de déchets FA-VL en emballages de transport à déchargement horizontal.

Les combustibles usés sont prévus d'être reçus ultérieurement dans le bâtiment nucléaire de surface EP2 initialement envisagé dans le cadre de l'inventaire de référence pour la prise en charge des colis de déchets HA1/HA2, pas avant l'horizon 2080. En fonction des décisions prises en particulier vis-à-vis de l'inventaire de réserve (stockage de tout ou partie des combustibles usés), la conception du bâtiment EP2 pourra, en conséquence, être définie et optimisée en temps utile de façon à mutualiser la gestion des colis de déchets HA et des colis de combustibles usés selon les mêmes principes de conception que pour le bâtiment EP1, le REX de son exploitation et selon la réglementation en vigueur.

Le tableau 3-2 présente les points d'attention liés aux spécificités des colis de l'inventaire de réserve (caractéristiques intrinsèques des colis, nombre et chroniques) en lien avec la conception des bâtiments concernés, pour chacune des typologies de colis.

Tableau 3-2 *Bâtiments prévus en tranches TU concernés par la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve et points d'attention associés*

Type de colis de déchets	ET-H	EP2[23]
HA supplémentaires (SR1)	-	Nombre et chronique : prolongation de la durée de fonctionnement de dix ans.
MA-VL supplémentaires (SR1)	Nombre et chronique : prolongation de la durée de fonctionnement de dix ans.	-
CU (SNR enveloppe)	-	Caractéristiques des colis (dimensions géométriques, masse, caractéristiques radiologiques...) : adaptation de la conception.
FA-VL	Caractéristiques de certains colis de stockage (absence de passage de fourches et masse) : adaptation d'équipements. Nombre : prolongation éventuelle de la durée de fonctionnement.	-

3.2.2 L'installation souterraine

En cas de prise en charge des colis de l'inventaire de réserve seuls certains ouvrages ou équipements de l'installation souterraine participeraient au transfert de ces colis et à leur mise en alvéole de stockage. Vis-à-vis des nouvelles typologies de colis présentes dans l'inventaire de réserve, il est étudié un stockage au sein des mêmes zones que celles prévues pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence. Ainsi :

[22] Le bâtiment ET-H permet les opérations spécifiques au déchargement des colis des emballages de transport mais la gestion des colis après déchargement jusqu'à la mise en hotte de transfert se fait dans le bâtiment EP1.

[23] À ce stade, pour prendre en charge les combustibles usés, dans le cadre des études de faisabilité et d'identification des dispositions conservatoires le choix de conception envisagé est de mutualiser la gestion des combustibles usés avec les colis de déchets HA au sein d'un nouveau bâtiment nucléaire dit « bâtiment EP2 mutualisé ».

- les combustibles usés sont stockés dans la zone de stockage HA, au sein d'un quartier de stockage dédié dit « quartier de stockage de combustibles usés », développé au nord et à l'est du quartier de stockage HA ;
- les colis de déchets FA-VL sont stockés dans la zone de stockage MA-VL, au sein d'un quartier de stockage dédié dit « quartier de stockage FA-VL », développé à l'est du quartier de stockage MA-VL.

3.2.2.1 Les parties de l'installation souterraine prévues en tranche T1

Les ouvrages de l'installation souterraine réalisés pour la tranche T1 de construction de l'INB sont présentés par la figure 3-3.

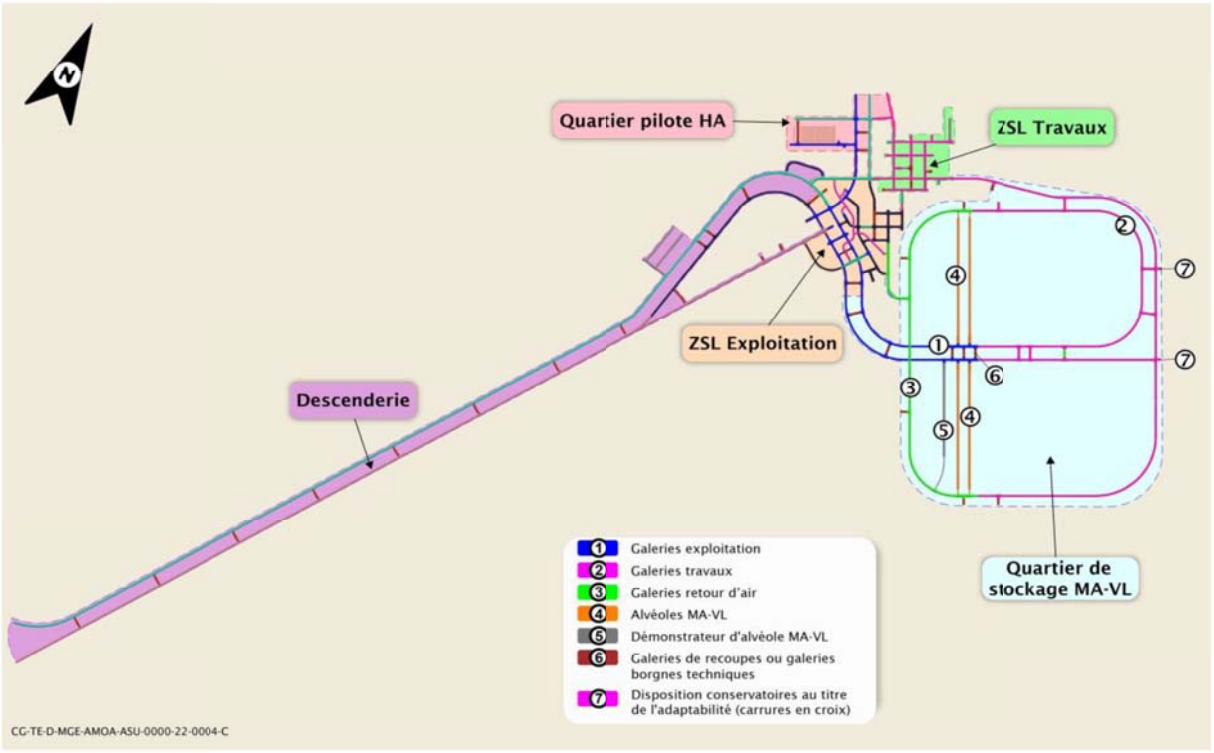


Figure 3-3 Installation souterraine de l'INB - Tranche T1

La descenderie colis et les galeries de liaisons servent au transfert de tous les colis sur toute la durée de fonctionnement de l'INB. Ainsi, ces parties de l'installation souterraine sont également concernées par la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve.

Concernant les zones de stockage de cette installation souterraine, les parties construites en tranche T1 sont le quartier pilote HA et une partie du quartier de stockage MA-VL dans lesquels il n'est pas prévu de stocker les colis de l'inventaire de réserve. Seule la construction de la boucle MA-VL est concernée par la prise en compte des colis de l'inventaire de réserve puisque le quartier de stockage FA-VL serait construit dans le prolongement du quartier de stockage MA-VL, à l'est.

Le tableau 3-3 présente les points d'attention liés aux spécificités des colis de l'inventaire de réserve (caractéristiques intrinsèques des colis, nombre et chroniques) en lien avec la conception des ouvrages concernés, pour chacune des typologies de colis.

Tableau 3-3 *Ouvrages prévus en tranche T1 concernés par la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve et points d'attention associés*

Type de colis de déchets	Descenderie colis et galeries de liaison	Boucle MA-VL
HA supplémentaires (SR1)	-	-
MA-VL supplémentaires (SR1)	-	-
CU (SNR enveloppe)	Caractéristiques des colis spécifiques	-
FA-VL	-	Ajout d'un quartier de stockage dédié en interface avec la boucle du quartier de stockage MA-VL.

3.2.2.2 Les parties de l'installation souterraine prévues pour les tranches TU

Les ouvrages de l'installation souterraine réalisés pour les tranches ultérieures (TU) de l'INB sont présentés par la figure 3-4.



Figure 3-4 *Installation souterraine de l'INB - Tranches TU*

Le développement des autres alvéoles/quartiers de stockage est réalisé lors des étapes successives de construction et de mises en service de l'INB. Cela concerne :

- au sein de la zone de stockage MA-VL :

- ✓ les alvéoles de stockage MA-VL au-delà des quatre premiers construits en tranche T1 ;
- ✓ le quartier de stockage FA-VL ;

- au sein de la zone de stockage HA :
  - ✓ le quartier de stockage HA ;
  - ✓ le quartier de stockage combustibles usés.

Le Tableau 3-4 présente les points d'attention liés aux spécificités des colis de l'inventaire de réserve (caractéristiques intrinsèques des colis, nombre et chroniques) en lien avec la conception des ouvrages concernés, pour chacune des typologies de colis.

Tableau 3-4 Ouvrages prévus en tranches TU concernés par la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve et points d'attention associés

Type de colis de déchets	Zone de stockage HA	Zone de stockage MA-VL
HA supplémentaires (SR1)	Nombre et chronique : emprise et prolongation de la durée de fonctionnement de dix ans.	-
MA-VL supplémentaires (SR1)	-	Nombre et chronique : emprise et prolongation de la durée de fonctionnement de dix ans.
CU (SNR enveloppe)	Nombre et chronique : emprise, ajout d'un quartier dédié et augmentation de la durée de fonctionnement.	-
FA-VL	-	Nombre et chronique : emprise, ajout d'un quartier dédié et augmentation de la durée de fonctionnement.

3.3 Les dispositions pour la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve dans l'INB - cas du stockage des colis de déchets HA et MA-VL induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc (SR1)

Les colis des déchets HA et MA-VL induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc représentent une faible augmentation du nombre de colis : environ 10 000 colis de déchets vitrifiés de type CSD-V et 120 colis MA-VL supplémentaires, comme présenté dans le chapitre 2.2.1.1 du présent volume. Ces colis de déchets HA et MA-VL supplémentaires seront stockés uniquement lors des tranches ultérieures (TU).

Cela ne remet pas en cause la capacité de gestion dans les bâtiments et ouvrages des installations de surface. De plus, comme ces colis présentent les mêmes caractéristiques que les colis de déchets HA et MA-VL de l'inventaire de référence, aucune modification du process et des équipements de ces installations ne sont nécessaires.

L'augmentation de la durée de fonctionnement des réacteurs électronucléaires peut conduire à une prolongation de la durée de fonctionnement du bâtiment EP1 de dix ans environ ce qui est couvert par la conception actuelle. En effet, le bâtiment est dimensionné pour une durée de fonctionnement de 100 ans en vue d'une exploitation d'environ 70 ans pour la prise en charge les colis de déchets de l'inventaire de référence.

Le faible nombre de colis de déchets MA-VL supplémentaires qui seraient à stocker au sein de la boucle MA-VL, construite quant à elle en tranche T1, n'implique pas de remise en cause de sa dimension et donc d'identifier des dispositions conservatoires sur cet ouvrage. La centaine de colis MA-VL supplémentaires ne représentent que 0,1 % de l'ensemble des colis de déchets MA-VL à stocker, ils peuvent ainsi être stockés dans les alvéoles existants compte tenu des capacités de stockage disponibles de ces alvéoles. En effet, les alvéoles MA-VL tels que prévus pour le stockage des colis de déchets MA-VL de l'inventaire de référence peuvent être allongés dans la limite des dimensions du quartier de stockage.

Le stockage des colis de stockage HA supplémentaires est rendu possible par l'ajout d'alvéoles dans le quartier de stockage HA. Cette extension s'appuie sur les mêmes principes de dimensionnement thermique et thermo-hydro-mécanique (THM) que pour la conception du quartier de stockage HA. Les deux options suivantes sont envisageables :

- extension du quartier de stockage HA vers l'est et vers l'ouest par prolongation des galeries d'accès (les quatre sous-quartiers existants sont seulement « étendus » vers l'est et l'ouest) ;
- extension du quartier de stockage HA vers le nord par l'ajout de deux sous-quartiers supplémentaires (passage de quatre sous-quartiers à six).

  Cette deuxième option permet de diminuer les temps de parcours ainsi que les pertes de charge liées à la ventilation.

Quelle que soit l'option retenue, l'évolution du quartier de stockage HA pour la prise en charge des colis de déchets HA de l'inventaire de réserve ne soulève pas de problème de faisabilité.

La conception définitive des quartiers de stockage HA et MA-VL permettant le stockage des colis de déchets HA et MA-VL induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc sera précisée sur la base de l'inventaire des colis à stocker retenu *in fine* et sur les mêmes principes de conception que ceux des quartiers de stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence.

Par ailleurs, la stratégie de surveillance, de maintenance et de gestion du vieillissement sur le génie civil des ouvrages de surface et souterrains de l'INB, notamment au regard de son allongement de durée de fonctionnement, est similaire à celle déployée pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence.

Synthèse des études de conception pour le stockage des colis de déchets HA et MA-VL de l'inventaire de réserve selon le scenario SR1 relatif à un allongement de la durée de fonctionnement du parc

La conception du stockage des colis de déchets HA et MA-VL retenue à ce stade pour l'inventaire de référence permet de stocker des colis de déchets HA et MA-VL supplémentaires induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc d'une durée d'une dizaine d'année sans mise en œuvre de disposition conservatoire initiale à la construction.

3.4 Les dispositions pour la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve dans l'INB - cas du stockage des colis de combustibles usés (SNR enveloppe)

La mise en conteneurs de stockage des colis de combustibles usés dans les installations de surface, leur transfert vers l'installation souterraine au moyen d'une hotte et leur mise en alvéole au sein d'un quartier de stockage dédié suit le même cheminement que celui des colis de déchets HA. Des adaptations aux spécificités des combustibles usés sont néanmoins à mettre en œuvre.

Les adaptations/modifications à apporter à la conception de l'INB retenue à ce stade pour prendre en compte les combustibles usés sont présentées dans la suite de ce chapitre selon le cheminement des colis.

3.4.1 La gestion des colis de combustibles usés dans les installations de surface jusqu'à la mise en hotte de transfert

La prise en charge éventuelle des colis de combustibles usés est envisagée à l'horizon 2080, et en conséquence, comme pour les colis de déchets HA1/HA2, elle ne relève pas du bâtiment EP1.

Comme pour HA1/H2, cette prise en charge nécessite la création d'un bâtiment dédié lors des tranches ultérieures de développement de l'INB.

Sans préempter des choix qui seront faits dans le cadre du développement progressif, il est retenu que la prise en charge des combustibles usés se fasse par le biais d'un bâtiment nucléaire permettant de mutualiser la gestion de tous les colis de déchets de haute activité, HA et combustibles usés, dit « bâtiment EP2 mutualisé ». La conception de ce type de bâtiment a été étudiée et sa faisabilité a été démontrée (cf. Éléments de justification dans le document qui présente les « Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve » (16)). Aucun élément rédhibitoire à la gestion des combustibles usés au niveau des installations de surface n'est identifié.

À ce titre, l'emplacement et la surface d'implantation prévus pour le bâtiment EP2 peut être conservé pour ce bâtiment EP2 mutualisé (cf. Empreinte en rouge sur la figure 3-5, visualisant la conception actuelle du bâtiment EP2 tel que prévu dans le volume 5 du présent rapport).

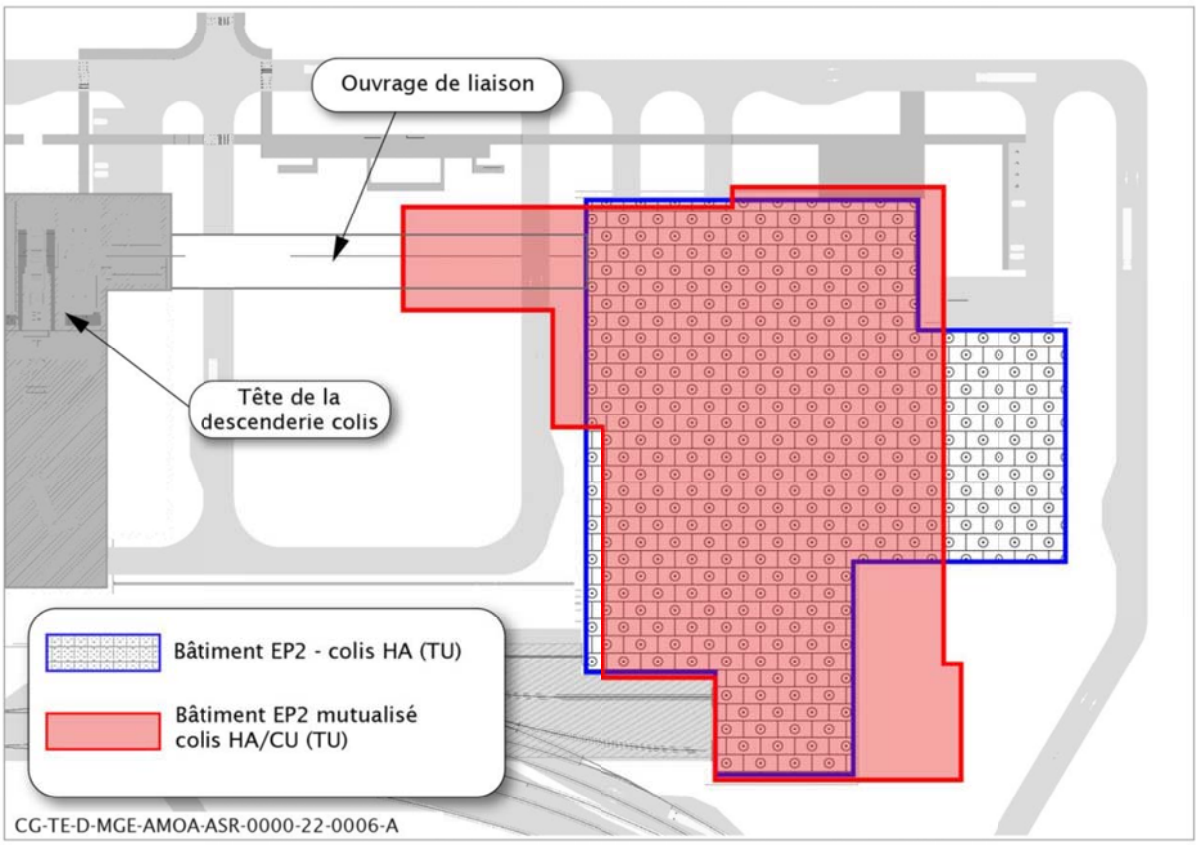


Figure 3-5 *Solution possible d'emplacement d'un bâtiment permettant la gestion des HA et CU*

3.4.2 Le dimensionnement du gabarit de la hotte de transfert des combustibles usés et conséquences sur les ouvrages et les moyens de transfert des installations de surface vers l'installation souterraine

Pour vérifier la compatibilité de certains ouvrages de l'INB (descenderie, galeries de liaison et galeries d'accès) avec le transfert des combustibles usés, un gabarit de hotte de transfert a été défini sur la base des dimensions géométriques les plus pénalisantes vis-à-vis :

- des colis de stockage de combustibles usés (diamètre et longueur) ;
- des protections radiologiques et thermiques en lien avec les caractéristiques les plus pénalisantes des combustibles usés ;
- des équipements de la hotte de transfert permettant la mise en alvéole des colis de stockage.

Ces éléments conduisent aux dimensions de gabarit de hotte de transfert, pour les colis de combustibles usés, tel que présentées dans la Figure 3-6.

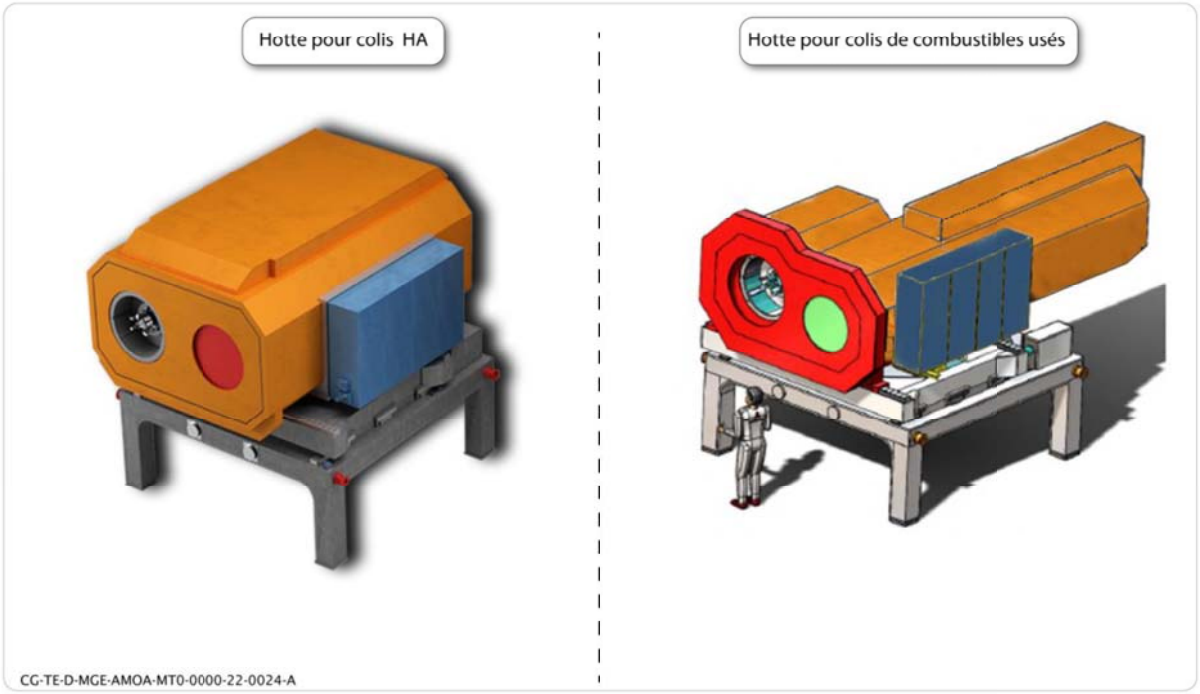


Figure 3-6 *Gabarit des hottes de transfert pour les colis de déchets HA et pour les combustibles usés*

Les dimensions du gabarit de hotte de transfert des colis de combustibles usés sont supérieures à celles des hottes de transfert dimensionnées pour recevoir les colis des déchets HA. Cela peut générer des incompatibilités avec les ouvrages de l'INB (i.e. Génie civil) et/ou avec le transfert et la mise en alvéoles de stockage (moyens de transfert et fonctionnement de l'exploitation) tels que prévues pour la gestion des colis de déchets de l'inventaire de référence.

Pour minimiser les conséquences de la prise en charge des colis de combustibles usés dans l'INB Cigéo, les choix de conception retenus consistent à conserver en priorité les dimensions du génie civil existant, et notamment les ouvrages réalisés lors de la construction initiale (*i.e.* Liaisons surface-fond (LSF) et zone de soutien logistique exploitation).

L'analyse de la compatibilité du passage de la hotte de transfert des colis de combustibles usés dans tous les ouvrages du génie civil tels que prévus pour la mise en alvéole de stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence montre que :

- les galeries ont des dimensions compatibles avec le passage de la hotte de transfert des colis de combustibles usés quelle que soit son orientation ;
- la longueur de la hotte de transfert des colis de combustibles usés impose d'orienter l'axe longitudinal de cette dernière selon l'axe des rails du funiculaire de la descenderie tel que présenté par la figure 3-7, afin de préserver les dimensions des ouvrages des LSF.

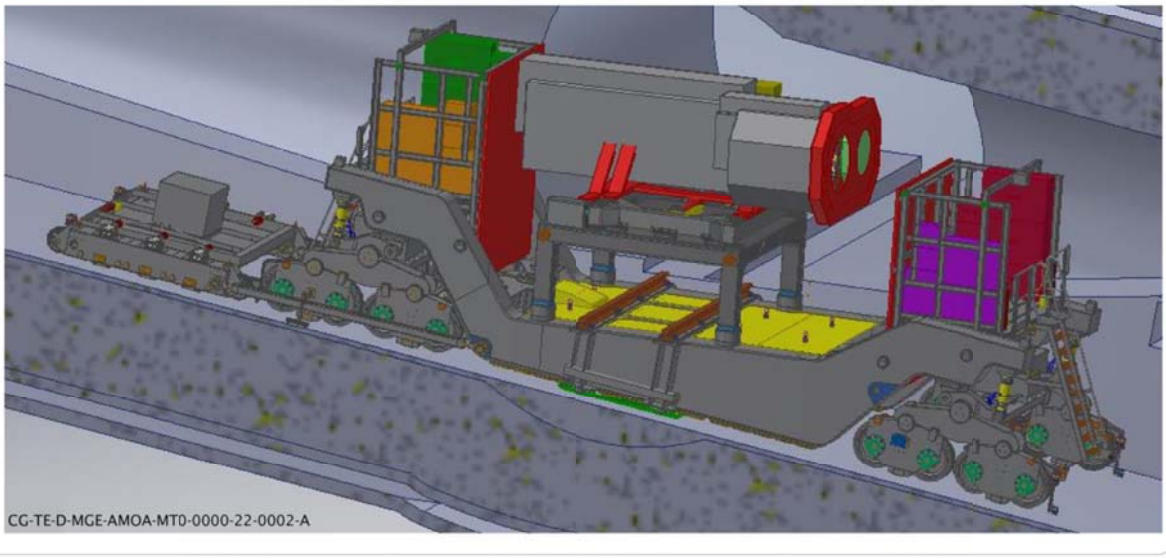


Figure 3-7 Hotte de transfert de combustibles usés sur le funiculaire

Cette disposition conduit à identifier d'autres adaptations à prendre en compte pour le transfert des colis de combustibles usés, aussi bien dans l'installation nucléaire en surface qu'en souterrain.

Ces adaptations sur les moyens de transfert, présentées dans les paragraphes suivants, sont de deux types :

- changement de l'orientation de la hotte de transfert de combustibles usés sur certains équipements de transfert (funiculaire, navettes et/ou chariots de transfert) ;
- ajout de plusieurs tables « double-fonction » dans les galeries de liaison pour permettre le changement d'orientation de la hotte de transfert selon les besoins identifiés.

3.4.2.1 La compatibilité avec les ouvrages des installations de surface en tranche T1

À l'arrivée en gare haute du funiculaire, la hotte de transfert doit être correctement orientée pour son transfert sur le funiculaire. Or, comme le bâtiment tête de descenderie tel que conçu ne permet pas d'effectuer des opérations de rotation de hotte en gare haute et que la voie d'accès vers l'entrée du funiculaire, dans la tête de descenderie, est perpendiculaire à l'axe des voies du funiculaire, la grande longueur de la hotte de transfert doit être orientée perpendiculairement à la voie d'accès qui achemine les hottes vers le funiculaire (cf. Figure 3-8).

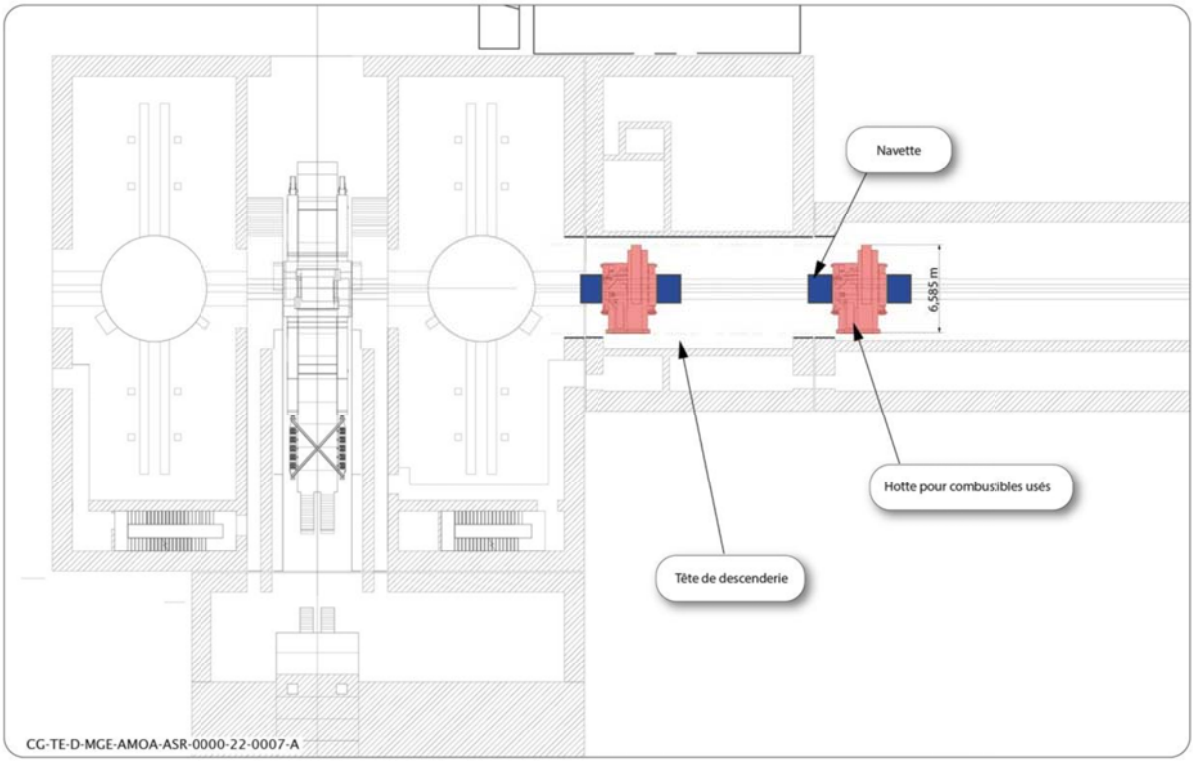


Figure 3-8 Transfert des colis CU vers la gare haute du funiculaire

Le volume de la réservation de passage[24] de la tête de descenderie nécessaire pour le transfert des hottes des colis HA n'est pas compatible avec la longueur de la hotte de transfert de combustibles usés du fait de l'orientation de cette dernière à cet endroit. Ainsi la conception de la tête de descenderie (tranche T1), intègre, à titre de disposition conservatoire, un mur fusible dont les dimensions sont compatibles avec le passage de la hotte de transfert de combustibles usés.

3.4.2.2 La compatibilité avec les ouvrages de l'installation souterraine en tranche T1

Tel qu'indiqué précédemment, l'analyse de la compatibilité du passage de la hotte de transfert des colis de combustibles usés dans tous les ouvrages du génie civil a permis d'identifier une solution permettant d'éviter d'avoir des impacts sur les ouvrages de la LSF, en adaptant la position de la hotte sur le funiculaire.

La hotte de transfert arrive en gare basse du funiculaire orientée perpendiculairement à l'axe des rails des galeries de la zone de soutien logistique exploitation (ZSLE). Comme les dimensions de la gare basse du funiculaire ne permettent pas la rotation de la hotte de transfert à cet endroit (de même que cette opération n'est pas faisable en gare haute du funiculaire), le départ de la hotte de transfert dans la ZSLE s'effectue perpendiculairement aux rails.

Pour permettre l'acheminement des colis de combustibles usés au moyen des hottes de transfert et des équipements de transfert existants et sans modifier le génie civil au niveau des croisements de galeries, il est retenu de mettre en place pendant l'exploitation de l'installation souterraine et en cas de décision de mise en service d'un quartier de stockage des combustibles usés, des tables tournantes double fonction[25] dédiée au transfert des hottes de transfert des combustibles usés en remplacement des tables tournantes de voie[26]. Cette solution, qui est compatible avec le transfert des colis de déchets de

[24] La réservation de passage est un espace fermé par un « mur fusible » qui peut être ouvert le cas échéant.
[25] La table tournante double fonction permet, de façon indépendante, la rotation des voies de roulement et celle du chariot ou de la hotte de transfert.
[26] La table tournante de voies permet la rotation des voies de roulement à chaque intersection galerie de liaison/galerie d'accès.

l'inventaire de référence et décrite plus précisément dans le document « Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve » (16), sera donc le cas échéant développée sans remettre en cause la conception actuelle de l'installation souterraine en tranche T1.

En conclusion, aucune disposition conservatoire à intégrer dès la construction initiale dans la conception de l'installation souterraine n'est donc nécessaire dans le cas du stockage des colis de combustibles usés de l'inventaire de réserve.

3.4.3 L'évolution de la conception des ouvrages de l'installation souterraine pour permettre la prise en charge des combustibles usés

Ce chapitre présente les évolutions à apporter à la conception de l'architecture souterraine pour permettre le stockage des combustibles usés dans les tranches ultérieures.

3.4.3.1 L'architecture de la zone de stockage HA qui regroupe le quartier de stockage HA et le quartier de stockage de combustibles usés

Dans le scénario de politique énergétique qui conduit à devoir stocker des combustibles usés dans l'INB Cigéo (SNR enveloppe), le volume de colis de stockage supplémentaires à stocker augmente d'un peu plus d'un facteur 2 par rapport au volume de colis de stockage HA de l'inventaire de référence.

Les colis de stockage de combustibles usés représentent 79 % du volume total à stocker. Les colis de stockage HA restants en représentent donc seulement 21 % avec une diminution du volume de 34 % environ par rapport au volume de colis de stockage HA de l'inventaire de référence[27].

La zone de stockage de haute activité (HA) comprend le quartier de stockage HA dont l'emprise est fonction de l'inventaire en colis de déchets HA à stocker et un nouveau quartier de stockage spécifique aux colis de combustibles usés. L'architecture de ces quartiers est le résultat d'études de dimensionnement thermique et thermo-hydro-mécanique (THM) qui, à partir du nombre et des caractéristiques des colis stockés (puissance, décroissance) et des caractéristiques de la formation hôte du Callovo-Oxfordien.

Au sein de la zone de stockage HA, les quartiers de stockage permettant de recevoir les colis de stockage HA et les colis de stockage de combustibles usés, correspondant au scénario de politique énergétique SNR enveloppe, sont définis comme suit :

- le quartier de stockage HA dont l'emprise est proportionnelle au nombre de colis de déchets HA (*i.e.* Diminution d'environ un tiers par rapport aux colis de déchets HA de l'inventaire de référence) se situe à l'emplacement de la partie ouest du quartier de stockage HA conçu pour recevoir les colis de déchets HA de l'inventaire de référence ;
- le quartier de stockage de combustibles usés occupe l'emplacement de la partie est du quartier de stockage HA conçu pour recevoir les colis de déchets HA de l'inventaire de référence ainsi qu'une zone qui s'étend vers le nord, au-delà des quartiers précédents.

  Selon les typologies de combustibles usés, et principalement du fait de leurs caractéristiques thermiques, leur contribution à la surface occupée par le quartier de stockage de colis de combustibles usés diffère. Toutefois, en raison de la variabilité thermique des colis de combustibles usés (cf. Chapitre 2.2.4.3.1 du présent volume), les parties peu denses de cette nouvelle architecture, où l'espacement entre colis est important, sont compensées par les parties plus denses, avec un espacement de colis plus serré. Pour exemple :

[27] Pour rappel, en termes de nombre de colis HA/CU (et non plus de volume), les combustibles usés représentent 64 % de la totalité des colis de cette catégorie.

- ✓ les combustibles usés de type MOX, qui ne représentent que 22 % du volume total des colis de stockage de combustibles usés, occupent environ 40 % de la surface occupée par le quartier de stockage de colis de combustibles usés ;
- ✓ les combustibles usés de type UNE, qui représentent 64 % du volume de colis de stockage de combustibles usés, occupent moins de 20 % de la surface occupée par le quartier de stockage de colis de combustibles usés.

Le stockage des colis de déchets HA et de combustibles usés du scénario SNR enveloppe d'évolution de politique énergétique conduit à étendre le quartier de stockage actuellement envisagé pour le stockage des colis HA1/HA2 de l'inventaire de référence proportionnellement à l'augmentation du volume de colis à stocker tel que présenté par la figure 3-9.

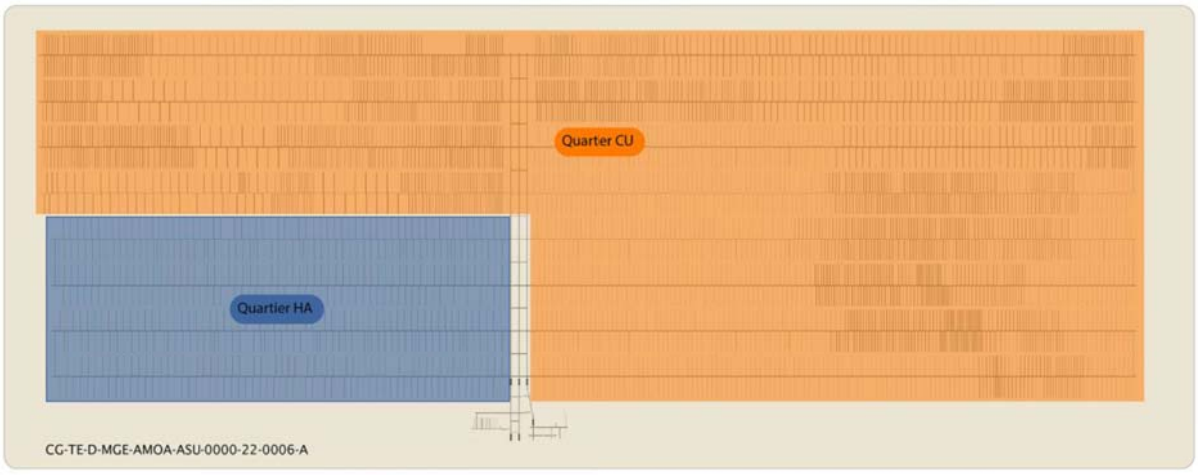


Figure 3-9 *Illustration des quartiers de stockage HA et de CU pour le scénario SNR enveloppe d'évolution de politique énergétique*

La conception des quartiers de stockage HA et de combustibles usés est similaire à celle du quartier de stockage HA (dimensions d'alvéoles, process de mise en place, galeries de liaisons communes...). Le stockage de combustibles usés implique donc une extension des ouvrages de stockage vers le nord et un prolongement des galeries de liaisons (GLI) et de secours (GES).

De façon identique aux principes retenus pour le stockage des colis de déchets HA, la ventilation nucléaire du quartier de stockage HA et de combustibles usés est dimensionnée afin de permettre, de façon simultanée, l'accès au personnel dans deux sous-quartiers de stockage pour des opérations d'exploitation et de maintenance. L'augmentation de la longueur des galeries au sein de cette zone se traduit par une augmentation des pertes de charge. Différentes solutions apportent des capacités supplémentaires de ventilation de ces quartiers sans que cela ne nécessite la prise en compte de dispositions conservatoires. Elles sont abordées dans le document qui présente les « Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve » (16). Par conséquent, la conception actuelle de la ventilation n'est pas rédhibitoire à une extension du quartier de stockage.

Les dimensions de la hotte de transfert des combustibles usés, dont la longueur est supérieure à celle des hottes de transfert HA, nécessitent d'adapter le diamètre des galeries d'accès (GAC) qui constituent la dernière étape dans l'acheminement des colis de stockage vers les alvéoles. Le diamètre de ces galeries retenu pour le quartier de stockage HA ne permet pas le passage de la hotte de transfert des combustibles usés. En effet, afin que l'ouverture de la hotte de transfert se retrouve face aux alvéoles de stockage, les hottes sont déplacées dans les galeries d'accès de sorte que l'axe des colis de stockage (qui correspond à la longueur de la hotte) soit orienté selon l'axe des alvéoles de stockage et donc perpendiculairement à l'axe de la galerie d'accès comme présenté par la figure 3-10.

Le diamètre de la galerie d'accès (GAC) nécessaire pour le passage de la hotte de transfert des colis de combustibles usés, différente de celle permettant le passage de la hotte de transfert des colis de déchets HA, correspond au diamètre des galeries de liaisons (GLI). La faisabilité de la construction de ces

galeries, dont les dimensions sont spécifiques au quartier de stockage des colis de combustibles usés, est donc déjà vérifiée par ailleurs. Pour réaliser ce creusement de plus grand diamètre, une chambre de montage de tunnelier doit être réalisée entre les galeries de liaisons et les galeries d'accès. Ce type de jonction sera réalisé de la même manière que les carrures de la même taille de l'architecture souterraine pour le stockage de colis de l'inventaire de référence.

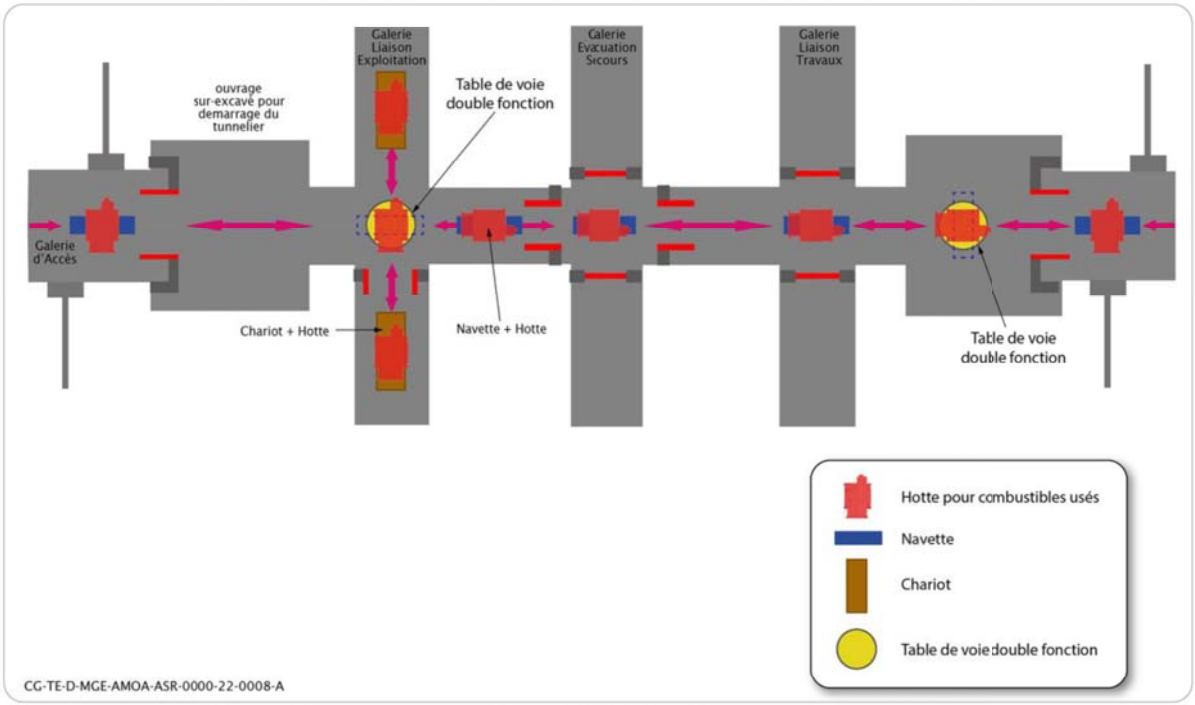


Figure 3-10 *Circulation des hottes de transfert de combustibles usés dans les galeries de liaison*

3.4.3.2 Le déploiement et l'exploitation de la zone de stockage HA

Le déploiement et l'exploitation des quartiers de la zone de stockage HA, pour les colis de l'inventaire de réserve, reprend les mêmes principes que ceux associés au quartier de stockage des colis de déchets HA de l'inventaire de référence : le déploiement des sous-quartiers s'effectue dans une dynamique sud-ouest, nord-ouest, nord-est, sud-est et les sous-quartiers déjà construits sont exploités de façon parallèle à la construction des nouveaux sous-quartiers[28].

Les travaux de caractérisation depuis la surface déterminent les paramètres thermo-hydro-mécaniques du Callovo-Oxfordien sur la ZIOS. Le dimensionnement thermique et thermo-hydro-mécanique (THM) du quartier de stockage de colis de combustibles usés s'appuie sur cette caractérisation. Ce dimensionnement thermique, montre comme pour le stockage des colis de déchets HA, que l'architecture des sous-quartiers de stockage pour les combustibles usés est flexible et permet de lisser des variations de données d'entrée (notamment la puissance thermique des colis et les chroniques de livraison associées), contribuant également à la maîtrise de l'emprise et du coût du stockage. Le déploiement peut donc se faire de manière graduelle en lien direct avec la chronique de livraison des colis de combustibles usés.

Les principes d'exploitation retenus pour le stockage des colis HA (cf. Volume 6 du présent rapport) sont transposables à la mise en stockage des colis de combustibles usés. Une adaptation des rythmes de fonctionnement pourra être envisagée afin de limiter la prolongation de la durée de fonctionnement de l'INB. Ainsi, le régime d'exploitation en 3 × 8 voire, pour certaines périodes à 5 × 8, au lieu de 2 × 8 à ce

[28] Pour rappel *« Les zones nucléaires d'une part et les autres zones d'autre part sont séparées par des barrières physiques (séparation des flux de personnels, des utilités, des fonctions supports, etc.) afin de limiter fortement les risques liés à la coactivité. »* (cf. « Dossier de justification des choix d'architecture souterraine » (18)).

stade retenu (cf. Chapitre 14 du volume 5 du présent rapport), permettra d'absorber des flux plus conséquents. Compte tenu que cette augmentation de rythme de travail diminue la capacité d'absorber d'éventuels retards liés à la disponibilité des quartiers du fait de la construction, les chroniques de livraison des colis devront être anticipées suffisamment en amont avec les producteurs pour construire au préalable les alvéoles nécessaires[29]. Par ailleurs, la stratégie de surveillance, de maintenance et de gestion du vieillissement sur le génie civil des ouvrages de surface et souterrains de l'INB, notamment au regard de son allongement de durée de fonctionnement, est similaire à celle déployée pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence.

En conclusion, le déploiement des quartiers de stockage HA, et de combustibles usés et leur exploitation pourront se faire selon les mêmes principes que ceux retenus pour le déploiement et l'exploitation des quartiers de stockage de l'inventaire de référence.

Synthèse des études de conception pour le stockage des colis de déchets HA et des colis de combustibles usés selon le scenario SNR enveloppe

L'analyse du stockage des colis de déchets HA et des colis de combustibles usés du fait de l'arrêt anticipé du retraitement de ces derniers, selon le scenario SNR enveloppe, montre :

- la faisabilité et la compatibilité de ce stockage avec les principes de conception retenus pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence ;
- pour la construction initiale (T1) :
  - ✓ installations de surface : le besoin de prendre des dispositions conservatoires dans la conception du mur fusible de la tête de descenderie pour permettre le passage de la hotte de transfert des combustibles usés et éviter ainsi des modifications substantielles de l'installation ;
  - ✓ installation souterraine : que les dimensionnements de la descenderie colis, du funiculaire et des galeries de liaisons permettent le stockage des colis sans aucune disposition conservatoire ni modification substantielle au préalable ;
- pour les tranches ultérieures (TU) : que des adaptations et des équipements complémentaires seront à mettre en place pour la mise en service d'un stockage de combustibles usés notamment au niveau du futur bâtiment nucléaire de surface EP2 et des quartiers de stockage avec un nombre d'alvéoles plus important et donc une extension plus importante que pour le stockage des déchets HA et MA-VL de l'inventaire de référence, sur la base des mêmes principes de dimensionnement que pour le stockage des colis HA (alvéoles horizontale et borgne, entraxes selon les critères THM).

3.5 La disposition pour la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve dans l'INB - cas du stockage des colis de déchets FA-VL

La préparation au stockage des colis de déchets FA-VL dans les installations de surface de l'INB (bâtiments nucléaires EP1 et ET-H), leur transfert vers l'installation souterraine au moyen d'une hotte de transfert et leur mise en alvéole au sein d'un quartier de stockage dédié suit le même cheminement que pour la gestion des colis de déchets MA-VL. Les adaptations ou modifications éventuelles à apporter à la conception de l'INB Cigéo sont présentées selon ce cheminement dans les paragraphes ci-après.

[29] Il faut compter entre 10 et 15 ans pour construire un sous-quartier composé d'environ 500 alvéoles.

3.5.1 La gestion des colis de déchets FA-VL dans les installations de surface (bâtiments nucléaires EP1 et ET-H)

Au regard des caractéristiques des colis de déchets FA-VL (cf. Chapitre 2.2.4 du présent volume), leur prise en charge éventuelle peut s'effectuer dans les mêmes installations de surface et, dans la mesure du possible, avec les mêmes équipements que ceux conçus pour la gestion des colis de déchets MA-VL. Le bâtiment nucléaire EP1 et l'ouvrage de déchargement des emballages à déchargement horizontal (ET-H) nécessitent toutefois des adaptations au regard de certaines caractéristiques spécifiques des colis de déchets FA-VL pour permettre également la gestion de ces colis de déchets, le cas échéant. En effet, la présence de deux nouveaux types de colis de stockage spécifiques aux colis de déchets FA-VL de l'inventaire de réserve, le CS4-graphite et le CBFK-B, qui diffèrent de ceux retenus pour les colis de déchets MA-VL essentiellement vis-à-vis de leurs caractéristiques géométriques et de leurs masses nécessite des adaptations telles que présentées dans les chapitres suivants. Pour autant, aucun élément rédhibitoire à la gestion des colis de déchets FA-VL au niveau des installations de surface n'est identifié.

Le bâtiment nucléaire EP1 est associé à la tranche 1 du centre de stockage Cigéo. Les adaptations le concernant constituent alors des dispositions conservatoires à prendre en compte dès sa conception actuelle. En revanche, le bâtiment nucléaire ET-H n'étant construit que pour une exploitation lors des tranches ultérieures, aucune disposition conservatoire le concernant n'est identifiée.

3.5.1.1 Les adaptations du bâtiment EP1 pour la construction initiale (T1)

La masse des colis de stockage CS4-graphite et CBFK-B (cf. Chapitre 2.2 du présent volume) sont à ce stade non compatibles avec le dimensionnement du pont roulant de la cellule de dégazage de la zone des éventuels contrôles hors flux (cf. Chapitre 4.1.13 du volume 5 du présent rapport). Dans l'éventualité de la mise en œuvre des éventuels contrôles hors-flux dans le bâtiment EP1, et afin de préserver la possibilité de stocker ces colis en cas de décision, des adaptations comme l'intégration dès la tranche T1 d'un pont roulant d'une capacité augmentée à 20 tonnes pourraient être intégrées en tant que dispositions conservatoires dans la conception. Le détail des adaptations est précisé dans le document « Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve » (16).

Par ailleurs, l'ajout de plus de 50 000 colis de déchets FA-VL au nombre de colis de déchets MA-VL déjà à prendre en charge par le bâtiment nucléaire EP1 constitue une augmentation du nombre de colis à gérer d'environ 30 %. Cette augmentation conduirait à prolonger la durée de fonctionnement du bâtiment nucléaire EP1 entre une dizaine et une vingtaine d'années. Toutefois même en intégrant cette durée supplémentaire d'exploitation, la durée d'exploitation, environ 85 ans, reste inférieure à la durée de fonctionnement couverte par la conception du bâtiment nucléaire EP1 de 100 ans.

3.5.1.2 Les adaptations du bâtiment ET-H pour une tranche ultérieure (TU)

Le bâtiment nucléaire ET-H, décrit au chapitre 4 du volume 5 du présent rapport, permet le déchargement de certains colis de déchets MA-VL pour la mise en service des tranches ultérieures. L'analyse de sa conception montre qu'elle permet la prise en charge des colis de déchets FA-VL de l'inventaire de réserve sans modification à ce stade, et notamment en ce qui concerne les interfaces avec les bâtiments et équipements prévus dès la construction initiale (T1).

3.5.2 L'architecture de la zone de stockage MA-VL qui regrouperait le quartier de stockage MA-VL et le quartier de stockage FA-VL

Le transfert des colis de déchets FA-VL s'effectue suivant les mêmes principes d'exploitation que pour les colis de déchets MA-VL et avec les mêmes équipements. La hotte de transfert des colis de déchets MA-VL est ainsi compatible avec les caractéristiques des colis de déchets FA-VL, y compris pour les colis CS4-graphite et CBFK-B. La conception de la descenderie colis et des galeries de liaisons permettent donc également celui des colis de déchets FA-VL.

Le volume de colis de stockage FA-VL à stocker représente environ 75 % du volume des colis de stockage MA-VL de l'inventaire de référence et nécessite une capacité de stockage de l'ordre de 14 alvéoles. Le stockage dédié aux colis de déchets FA-VL est étudié en extension de la zone de stockage MA-VL au-delà du quartier de stockage MA-VL à l'est du quartier de stockage MA-VL[30].

L'ajout des nouvelles galeries permettant de construire le quartier de stockage FA-VL et d'acheminer les colis de stockage ainsi que la construction des alvéoles de stockage de ce quartier pourront être réalisés lors des tranches ultérieures comme cela est déjà le cas pour le stockage des colis MA-VL.

3.5.2.1 Les adaptations des ouvrages de la zone de stockage MA-VL pour la construction initiale (T1)

Pour faciliter l'extension de la zone de stockage MA-VL, par l'ajout d'un second quartier de stockage à l'est de la boucle MA-VL, l'intégration des deux carrures en croix, à la place des carrures en T, tel qu'indiqué sur la figure 3-11 a été considérée en tant que disposition conservatoire.

3.5.2.2 Les adaptations des ouvrages de la zone de stockage MA-VL pour les tranches ultérieures (TU)

Pour permette l'extension de la zone de stockage MA-VL, par l'ajout d'un second quartier de stockage à l'est de la boucle MA-VL, il est nécessaire d'ajouter lors des tranches ultérieures de déploiement de l'installation souterraine des nouveaux ouvrages tels que, par exemple, deux nouvelles carrures au niveau de la boucle MA-VL, un local technique supplémentaire à l'emplacement du point de démarrage d'une des galeries de l'éventuel quartier de stockage supplémentaire et un refuge supplémentaire au niveau d'une galerie du quartier de stockage MA-VL (cf. Figure 3-11).

[30] Cette solution valide la faisabilité du stockage des colis de déchets FA-VL dans l'INB Cigéo mais ne préempte pas de la manière dont les colis de déchets MA-VL et FA-VL seraient répartis dans les alvéoles de stockage des deux quartiers de la zone de stockage MA-VL (à l'intérieur ou en dehors de la boucle MA-VL) selon les chroniques d'arrivée, si la même solution de stockage était retenue.

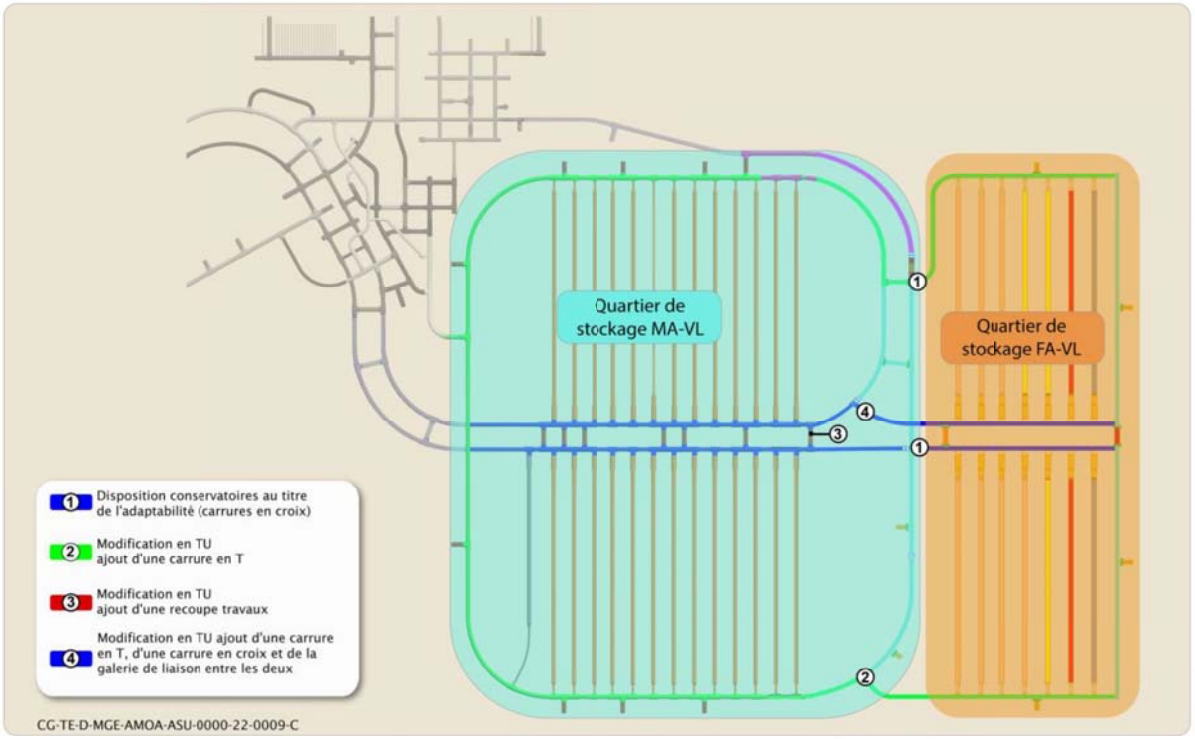


Figure 3-11 *Les adaptations des ouvrages de la zone de stockage MA-VL lors des tranches ultérieures (TU)*

L'augmentation éventuelle du volume total de colis de déchets à stocker dans la zone de stockage MA-VL lié à l'ajout des colis de déchets FA-VL conduisant à l'exploitation de 14 alvéoles de stockage supplémentaires nécessite de prolonger le fonctionnement de la zone de stockage MA-VL de 18 ans environ. Les différents ouvrages de l'installation souterrain intègrent dès à présent cette durabilité dans leur conception.

La ventilation nucléaire de la zone de stockage recevant les colis de déchets FA-VL avec les colis de déchets MA-VL de l'inventaire de réserve est dimensionnée selon les mêmes principes que pour le stockage des colis de déchets MA-VL de l'inventaire de référence. Pour assurer la totalité de la ventilation de la zone de stockage, les débits de soufflage et d'extraction sont accrus de l'ordre de 20 à 25 %. En outre, l'augmentation des pertes de charge liée à l'emprise de la zone de stockage est couverte par la conception actuelle et ne conduit donc pas à l'identification de dispositions conservatoires.

Synthèse des études de conception pour le stockage des colis de déchets FA-VL

L'analyse du stockage des colis de déchets FA-VL en cas de modification de la filière de gestion de ces déchets montre :

- la faisabilité et la compatibilité de ce stockage avec les principes de conception retenus pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence ;
- pour la construction initiale (T1) :
  - ✓ installations de surface : le besoin de prendre des dispositions conservatoires dans la conception du bâtiment nucléaire EP1 (dont les équipements) vis-à-vis des modifications engendrées par la masse des colis de stockage CS4-graphite et CBFK-B ;
  - ✓ installation souterraine : que des dispositions conservatoires sont prises dans la conception de la boucle MA-VL qui sont la modification de deux carrures, d'une conception en T à une conception en X ;
- pour les tranches ultérieures (TU) : que des adaptations et des équipements complémentaires seront à mettre en place pour faciliter la mise en service éventuelle d'un stockage de colis de déchets FA-VL notamment au niveau de l'ouvrage de déchargement des emballages à déchargement horizontal et de la zone de stockage MA-VL (ajout du quartier de stockage FA-VL) sur la base des mêmes principes de dimensionnement que pour le stockage des colis de déchets MA-VL et en restant compatible avec la durée d'exploitation d'ordre séculaire de l'INB.

4

La sûreté de l'INB vis-à-vis du stockage des colis de l'inventaire de réserve

4.1 Une démarche de sûreté analogue à celle menée pour les colis de l'inventaire de référence 74
4.2 Les spécificités du stockage des colis de l'inventaire de réserve vis-à-vis de la sûreté de l'INB 74
4.3 L'analyse préliminaire de sûreté 78

4.1 Une démarche de sûreté analogue à celle menée pour les colis de l'inventaire de référence

L'INB Cigéo doit répondre à l'objectif défini par l'article L. 542-1 du code de l'environnement vis-à-vis du *« respect de la protection de la santé des personnes, de la sécurité et de l'environnement »* durant sa phase de fonctionnement et sur le long terme après sa fermeture. La sûreté de l'INB garantie pendant l'exploitation et après sa fermeture dans le cas du stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence doit être préservée vis-à-vis des risques spécifiques que comportent le stockage des colis de l'inventaire de réserve. Les enjeux pour la sûreté de l'INB vis-à-vis du stockage de ces colis sont alors identifiés.

La démarche générale de sûreté établie dans le cas du stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence (cf. Chapitre 1 du volume 2 du présent rapport) est également applicable dans le cadre des études d'adaptabilité. Elle comprend deux analyses de sûreté menées en parallèle, en lien avec les deux phases temporelles précitées, qui permettent d'assurer le respect de l'ensemble des fonctions de sûreté préalablement définies pour satisfaire la protection de l'homme et l'environnement.

L'absence *« d'élément rédhibitoire au stockage des déchets de cet inventaire de réserve »* (cf. Avis n° 2018-AV-0300 du 11 janvier 2018 (2)) vis-à-vis de la sûreté associée à la conception de l'installation est vérifiée par la réalisation d'une analyse préliminaire de sûreté pour la phase long terme après-fermeture et pour la phase de fonctionnement. Cette analyse préliminaire repose sur la démonstration de sûreté du stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence (cf. Volumes 8 et 9 du présent rapport, respectivement pour la phase long terme après-fermeture et pour la phase de fonctionnement) au regard des risques pour la sûreté de l'INB vis-à-vis du stockage des colis de l'inventaire de réserve précédemment identifiés.

4.2 Les spécificités du stockage des colis de l'inventaire de réserve vis-à-vis de la sûreté de l'INB

Les colis de l'inventaire de réserve et leur stockage dans l'INB Cigéo présentent un ensemble de caractéristiques propres liées, soit au nombre de colis plus important et/ou aux caractéristiques spécifiques de certains colis, soit aux adaptations de la conception des installations/ouvrages pour leur mise en stockage.

Les chapitres suivants identifient les éléments de démonstration de sûreté de l'INB en phase de fonctionnement et/ou en phase long terme après-fermeture du centre de stockage Cigéo concernés par ces caractéristiques propres et en particulier pour déterminer ceux pour lesquels une analyse préliminaire est nécessaire pour confirmer la sûreté de l'INB vis-à-vis du stockage des colis de l'inventaire de réserve (cf. Chapitre 4.3 du présent volume).

4.2.1 Les caractéristiques propres des colis de l'inventaire de réserve

Les principales spécificités de l'inventaire de réserve par rapport à l'inventaire de référence[31] ayant potentiellement une incidence sur la démonstration de sûreté concernent :

- l'augmentation du nombre de colis stockés et corrélativement de la quantité de radionucléides et de substances toxiques chimiques présents dans les ouvrages de stockage une fois fermés définitivement ;
- les caractéristiques intrinsèques des colis et qui peuvent être différentes pour certaines typologies de familles de colis (*i.e.* Combustibles usés et certaines familles de déchets FA-VL tel que présenté au chapitre 2.2.1 du présent volume).

En cas de décision de stocker des colis de l'inventaire de réserve selon les scénarios retenus au chapitre 2.1 du présent volume, l'augmentation du nombre de colis stockés *in fine* dans l'installation souterraine de l'INB induit une augmentation de la quantité de *« substances radioactives et* [de] *toxiques chimiques contenus dans les déchets radioactifs »* dont il faut *« protéger les personnes et l'environnement »* (cf. Principes de sûreté du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (19)). L'évaluation de sûreté après-fermeture permet d'en vérifier les conséquences.

4.2.1.1 Les caractéristiques intrinsèques des colis de l'inventaire de réserve

4.2.1.1.1 Les colis de déchets HA et MA-VL

Les colis de déchets HA et MA-VL de l'inventaire de réserve présentent des caractéristiques identiques à celles des colis de déchets de l'inventaire de référence. La prise en compte des scénarios d'inventaire retenus se traduisent en une évolution du nombre d'alvéoles HA et MA-VL. En conséquence, c'est principalement l'augmentation du nombre de colis qui a fait l'objet, pour les scénarios considérés pour l'inventaire de réserve concerné, d'une analyse vis-à-vis de la démonstration de sûreté.

4.2.1.1.2 Les colis de combustibles usés

Les principales caractéristiques intrinsèques des colis de combustibles, différentes de celles des colis de déchets HA et ayant fait l'objet d'une analyse de leur incidence sur la démonstration de sureté de l'INB, sont les suivantes :

- la nature différente des composants internes des combustibles usés (matrice et aciers de structures) vis-à-vis du relâchement des radionucléides :

  Pour rappel, les déchets HA vitrifiés sont composés d'une matrice en verre au sein de laquelle sont incorporés les radionucléides (cf. Volume 8 du présent rapport). Les colis de combustibles usés contiennent des assemblages combustibles usés (crayons, aiguilles, plaques, tronçons, fragments, etc.) avec différentes typologies de matériaux (oxydes d'uranium ou mixte U-Pu, carbure, siliciure, etc.), avec différents états physico-chimiques de matériaux, et pour un enrichissement et un taux de combustion variables selon les familles. La nature physico-chimique et a répartition spatiale des radionucléides et des substances toxiques chimiques au sein des combustibles usés sont hétérogènes entre les différents matériaux et au sein des matériaux. Les modèles de comportement et de relâchement des combustibles usés retenus pour la démonstration de sûreté après-fermeture sont donc spécifiques ;
- la présence en quantité plus importante de certains radionucléides à vie courte et à vie longue (cf. Chapitre 2.2.3 du présent volume) vis-à-vis :

[31] Pour rappel, les modifications d'inventaire liées à la prise en compte de l'inventaire de réserve peuvent être bien supérieures à celles engendrées par la prise en compte de la flexibilité du stockage (cf. Volume 11 du présent rapport) car elles sont liées à une modification conséquente de l'inventaire stocké et non simplement à la prise en compte d'une « flexibilité » sur cet inventaire.

- ✓ de l'analyse du risque d'exposition lié aux rayonnements ionisants et donc l'impact sur le dimensionnement de certains équipements comme l'épaisseur des protections radiologiques, la hotte de transfert des colis de stockage de combustibles usés, les bouchons de radioprotection des alvéoles contenant des combustibles usés ou les voiles en béton du bâtiment EP2 mutualisé (cf. Chapitre 0 du présent volume) ;
- ✓ de l'analyse du risque de criticité compte tenu de la présence plus importante en matières fissiles, en particulier l'uranium 235 et le plutonium 239 ;
- ✓ de l'évaluation des incidences sur l'homme pour les radionucléides mobiles à vie longue, en particulier l'iode 129 (cf. Chapitre 2.2.3.1.1 du présent volume) ;

- la longueur des colis de combustibles usés et donc le dimensionnement de la hotte de transfert (cf. Chapitre 3 du présent volume) et par conséquent, potentiellement des équipements et installations de l'INB en lien avec la sûreté en exploitation associée (cf. Chapitre 3 du présent volume).

4.2.1.1.3 Les colis de déchets FA-VL

En regard des éléments présentés en chapitre 2 du présent volume, la spécificité liée aux caractéristiques intrinsèques des déchets FA-VL pouvant présenter une incidence sur la sûreté vis-à-vis de risques internes au colis pour la phase de fonctionnement (notamment en ce qui concerne le risque incendie) et vis-à-vis du relâchement pour la phase long terme est la présence de déchets de graphite.

Comme indiqué au chapitre 2.2.1.3 du présent volume, les études menées dans le cadre de la flexibilité et dont les enseignements sont présentés au volume 11 du présent rapport, couvrent les colis de déchets bitumés FA-VL (seules des caractéristiques radiologiques de plus faible activité permettent de les distinguer des colis de déchets bitumés MA-VL). De plus, s'il était décidé de les stocker dans les ouvrages souterrains de l'INB Cigéo, un mode de stockage correspondant à celui retenu pour les colis de déchets bitumés MA-VL pourrait être retenu.

Au sujet des conteneurs de stockage considérés, bien que les conteneurs CBF-C2K et CBFK-B soient des conditionnements spécifiques aux colis de déchets FA-VL, leurs caractéristiques sont couvertes par celles des conteneurs MA-VL. Les autres conditionnements sont identiques à ceux retenus pour les colis de déchets MA-VL de l'inventaire de référence.

4.2.2 Les dispositions conservatoires et/ou évolutions de la conception de l'INB liées au stockage des colis de l'inventaire de réserve

L'éventualité du stockage de tout ou partie des colis de l'inventaire de réserve implique de considérer, dès la construction initiale (dite « Tranche 1 » ou T1) et lors des tranches ultérieures de développement de l'INB (dites TU), des adaptations de la conception (cf. Chapitre 3 du présent volume). Certaines de ces adaptations intègrent de façon inhérente les conséquences sur la sûreté de l'INB car elles ont justement pour origine la prise en compte des enjeux liés aux spécificités des colis (cf. Chapitre 4.2.1 du présent volume). Les autres modifications de conception qui sont liées à des contraintes autres que celles de sûreté (en lien avec le process par exemple), peuvent soulever de nouveaux risques pour la sûreté de l'INB. Les modifications de conception liées à l'adaptabilité, explicitées au chapitre 3 du présent volume, sont rappelées succinctement ci-après selon l'étape de construction de l'INB à laquelle elles s'appliquent et selon la partie de l'INB concernée. Les incidences de ces modifications sur la sûreté de l'INB sont identifiées sachant que :

- vis-à-vis de la sûreté long terme après-fermeture, ces incidences sont uniquement liées au dimensionnement de l'installation souterraine ;
- vis-à-vis de la sûreté en exploitation, ces incidences sont liées au dimensionnement des ouvrages/équipements nucléaires.

4.2.2.1 Les dispositions conservatoires de conception retenues pour la construction initiale (T1)

Pour rappel, les dispositions conservatoires suivantes à envisager dès la construction initiale (T1) sont :

- installation de surface :
  - ✓ bâtiment nucléaire EP1 : modifications de certains équipements du bâtiment pour tenir compte de la masse de certains colis de stockage FA-VL ;
  - ✓ tête de descenderie colis : prise en compte des dimensions du gabarit de la hotte CU afin de permettre son transfert vers l'installation souterraine ;
- installation souterraine :
  - ✓ zone de stockage MA-VL : modification de deux carrures au sein de la boucle MA-VL afin de permettre l'extension de cette zone pour l'ajout, le cas échéant, du quartier ce stockage FA-VL.

Ces dispositions conservatoires ne présentent aucune conséquence sur la sûreté après-fermeture puisque la seule adaptation identifiée dans l'installation souterraine ne concerne pas les composants assurant les fonctions de sûreté après-fermeture et ne sont pas de nature à remettre en cause les conclusions de la démonstration de sûreté présentée au volume 8 du présent rapport.

En ce qui concerne la phase de fonctionnement, les dispositions conservatoires envisagées pour le bâtiment EP1, ainsi que celles identifiées pour la zone de stockage MA-VL, ne présentent aussi aucune conséquence pour la sûreté. Celles concernant la tête de descenderie sont directement liées au dimensionnement des hottes de combustibles usés, dont les dimensions permettent de respecter les objectifs de protection vis à vis du risque lié à l'exposition des rayonnements ionisants. La sûreté en exploitation est ainsi déjà intégrée dans les dispositions conservatoires identifiées pour cet équipement.

4.2.2.2 Les dispositions/évolutions dans la conception lors des tranches ultérieures (TU) de construction

Sur la base de la conception à ce stade de l'INB, les éléments suivants à prendre en compte lors des tranches ultérieures de construction sont :

- installation de surface :
  - ✓ bâtiment EP2 : nouvelle conception du bâtiment pour intégrer la prise en charge des combustibles usés en plus de celles des colis de déchets HA (bâtiment dit « EP2 mutualisé ») ;
  - ✓ bâtiment ET-H : adaptation de la conception du bâtiment pour intégrer la prise en charge des colis de déchets FA-VL en plus de celles des colis de déchets MA-VL ;
- installation souterraine :
  - ✓ zone de stockage HA : extension du quartier de stockage HA pour accueillir des colis de déchets HA supplémentaires ou ajout d'un quartier de stockage spécifique pour accueillir les colis de combustibles usés ;
  - ✓ zone de stockage MA-VL : déploiement d'un quartier de stockage spécifique FA-VL pour accueillir cette typologie de déchets.

Les extensions des zones de stockage sont prises en compte pour la sûreté après-fermeture de l'INB vis-à-vis de certaines hypothèses support aux évaluations de sûreté. Principalement, le modèle hydrogéologique du site à l'actuel et sur le prochain million d'années (cf. chapitre 2 du volume 8 du présent rapport) reste valide puisqu'il est indépendant des évolutions de conception.

Les incidences sur la sûreté en exploitation de ces adaptations concernant les tranches ultérieures de construction sont analysées en lien avec le développement progressif de l'installation. La possibilité du stockage des colis de l'inventaire de réserve et donc la prise en compte des risques de sûreté associés, en particulier concernant les risques liés à la coactivité présentés dans le volume 9 du présent rapport, seront toujours intégrées en donnée d'entrée des évolutions de conception.

4.3 L'analyse préliminaire de sûreté

4.3.1 Pour la phase long terme après-fermeture

Le rapport intermédiaire transmis en 2019 à la Direction générale de l'énergie et de climat présente le « Contenu des études relatives à l'adaptabilité de Cigéo au stockage des déchets de l'inventaire de réserve » (9) et précise en particulier la démarche retenue pour évaluer la sûreté après-fermeture de l'INB : *« la démarche* (NB : pour l'après fermeture) *consiste [...] à préciser les éventuels risques induits par les déchets de l'inventaire de réserve. À ce titre, il s'agit d'évaluer l'impact de la prise en compte des déchets de l'inventaire de réserve sur les études menées pour l'inventaire de référence. Le cas échéant, sont identifiées les dispositions de conception qui ont un lien avec la démonstration de sûreté à long terme.*

L'impact sur la définition des scénarios de sûreté est également étudié et certaines évaluations sont menées selon l'intérêt qu'elles présentent en cohérence avec l'objectif des études d'adaptabilité à un niveau esquisse. »

Le présent chapitre décline la mise en œuvre de cette démarche.

4.3.1.1 Les hypothèses de définition des architectures à terminaison support aux études d'adaptabilité

Les études d'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve s'appuient sur des scénarios possibles de politique énergétique ou de filières de gestion de déchets (cf. Chapitre 2.1.1 du présent volume). À ce titre, la ou les architectures souterraines dites à terminaison[32] retenues pour les évaluations de sûreté après-fermeture sont définies afin de refléter le système de stockage à sa fermeture définitive[33] tel qu'envisagé pour ces scénarios.

Selon l'un ou l'autre des scénarios de politique énergétique retenu (*i.e.* SR1 et SNR enveloppe), les combustibles qui n'ont pas encore fait l'objet de retraitement sont soit stockés sous leur forme retraitée (SR1), soit stockés en l'état (SNR enveloppe). Le stockage de chacune des typologies de déchets associées (respectivement les colis de déchets HA et MA-VL liés au retraitement des combustibles usés et les combustibles usés stockés en l'état) fait l'objet d'une architecture souterraine à terminaison propre. Pour chaque architecture s'ajoutent les colis de déchets FA-VL. En effet, la politique de gestion des déchets FA-VL est indépendante de l'évolution de la politique énergétique française et par conséquent des scénarios SR1 et SNR enveloppe associés. Le stockage des déchets FA-VL est alors associés aux deux scénarios de politique énergétique précités.

Au titre de l'adaptabilité, les deux architectures de l'installation souterraine suivantes sont considérées pour l'évaluation de sûreté long terme après-fermeture :

- une architecture correspondant au stockage des colis de déchets HA et MA-VL induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc et au retraitement des combustibles usés associée au stockage des colis de déchets FA-VL (SR1 + FA-VL) ;
- une architecture correspondant au stockage des combustibles usés en l'état et associée au stockage des colis de déchets FA-VL (SNR enveloppe + FA-VL).

L'analyse de sûreté préliminaire menée avec ces deux architectures permet de dégager des grandes lignes générales quant aux effets ou l'absence d'effet d'une évolution d'inventaire de colis dans le cadre

[32] Il s'agit d'une illustration à ce stade de la demande d'autorisation de création, représentant la projection des options techniques retenues à ce stade. Dans le futur, ces options pourront être enrichies des avancées scientifiques et technologiques ainsi que des optimisations et améliorations possibles, au regard notamment du retour d'expérience au fur et à mesure du développement progressif de l'INB Cigéo. L'architecture à terminaison comprend tous les colis de stockage considérés à la fermeture du centre de stockage Cigéo.

[33] Le système de stockage après fermeture comprend la couche du Callovo-Oxfordien, les colis de stockage et les ouvrages souterrains remblayés et scellés.

de l'adaptabilité sur la performance du stockage en après fermeture et les incidences radiologiques après fermeture.

4.3.1.2 L'inventaire radiologique retenu

Au stade d'esquisse, les radionucléides retenus pour les évaluations après-fermeture sont notamment les trois radionucléides mobiles à vie longue, iode 129, chlore 36 et sélénium 79 (cf. Volume 8 du présent rapport). Comme indiqué au chapitre 4.2.1 du présent volume, la prise en compte des colis de l'inventaire de réserve conduit à des inventaires radiologiques totaux différents de ceux de l'inventaire de référence du fait de l'augmentation du nombre de colis et/ou des caractéristiques spécifiques de certaines familles de colis (modification des types et quantités de radionucléides par colis). Pour les deux cas d'architecture retenus au titre de l'adaptabilité, l'évolution des inventaires radiologiques en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 est présentée comme suit selon les zones de stockage par rapport à l'inventaire associé au stockage des colis HA et MA-VL de l'inventaire de référence.

» NOTE IMPORTANTE

- les combustibles usés et les déchets FA-VL ne présentent pas de radionucléides et de substances toxiques différents/particuliers par rapport à ceux de l'inventaire de référence ;
- l'inventaire total en radionucléides des combustibles usés qui sont retraités ne se retrouve pas intégralement dans les déchets HA et MA-VL correspondants. En effet, certains radionucléides, comme l'iode 129, font l'objet d'une autorisation de rejet à l'usine de retraitement, de sorte qu'ils ne se retrouvent pas intégralement dans les déchets HA et MA-VL correspondants ;
- du fait de l'origine même des déchets FA-VL, leur inventaire radiologique est indépendant de celui des combustibles usés, donc de celui des déchets HA et MA-VL correspondants dans le cas du retraitement des combustibles usés. Les déchets FA-VL présentent néanmoins des radionucléides communs, en particulier des radionucléides mobiles à vie longue comme l'iode 129 et le chlore 36 (cas des graphites) ou le carbone 14 (pro parte sous forme gazeuse).

Stockage des colis de déchets HA et MA-VL induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc associé à celui des colis de déchets FA-VL (SR1 + FA-VL)

- l'inventaire radiologique du quartier de stockage HA augmente d'environ 20 % pour l'iode 129 et le chlore 36, et d'environ 10 % pour le sélénium 79 ;
- l'inventaire radiologique de la zone de stockage MA-VL et FA-VL est inchangé pour le sélénium 79. Il augmente d'environ :
  - ✓ 12 % pour l'iode 129, uniquement en raison de la présence des colis de déchets FA-VL ;
  - ✓ 14 % pour le chlore 36, dont 9 % est lié à l'augmentation du nombre de colis de déchets MA VL (120 C1PG^{SP}) et 5 % aux colis de déchets FA-VL.

Stockage des combustibles usés associé à celui des colis de déchets FA-VL (SNR enveloppe + FA-VL)

- l'inventaire radiologique de la zone de stockage HA et de combustibles usés :
  - ✓ augmente d'un facteur 44 pour l'iode 129 bien que la quantité de ce radionucléide diminue de 33 % pour les colis de déchets HA seuls. Cela est lié au fait que l'iode 129 est contenu à près de 97 % dans les combustibles usés. Rapporté à toute l'architecture, l'augmentation totale en iode 129 est d'un facteur 24 ;
  - ✓ diminue d'environ 9 % pour le chlore 36, avec 27 % de diminution de ce radionucléide pour les colis de déchets HA atténuée par la part liée à l'ajout des combustibles usés ;
  - ✓ augmente d'environ 5 % pour le sélénium 79, avec 32 % de diminution de ce radionucléide pour les colis de déchets HA compensée par la part liée à l'ajout des combustibles usés ;
- l'inventaire radiologique de la zone de stockage MA-VL et FA-VL :

- ✓ diminue d'environ 7 % pour l'iode 129, avec 19 % de diminution de ce radionucléide pour les colis de déchets MA-VL compensée par la part liée à l'ajout des colis de déchets FA-VL ;
- ✓ augmente d'environ 9 % pour le chlore 36, dont près de 4 % est lié à l'ajout de 120 C1PG^{SP} du fait de l'allongement de la durée du parc et le reste lié à l'ajout des colis de déchets FA-VL ;
- ✓ diminue d'environ 4 % pour le sélénium 79 en raison de la diminution du nombre de colis de déchets MA-VL.

Les augmentations d'inventaire radiologique des radionucléides à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) pour l'inventaire de réserve par rapport à l'inventaire de référence sont toutes inférieures à un facteur 2, à l'exception de l'iode 129 avec une augmentation totale d'un facteur 20 environ pour le stockage des combustibles usés en l'état associé à celui des déchets FA-VL.

4.3.1.3 La démarche d'évaluation de la sûreté après-fermeture retenue

L'évaluation de la sûreté après-fermeture mise en œuvre par l'Andra pour le stockage des colis de l'inventaire de réserve est menée au stade d'esquisse. Elle s'appuie sur celle développée pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence (cf. Chapitre 1 du volume 8 du présent rapport), notamment en termes d'évolution phénoménologique du système stockage et du milieu géologique environnant et en termes de grands déterminants de la sûreté après-fermeture. L'analyse de risques et des incertitudes au stade d'esquisse s'appuie également sur la même méthodologie.

Suivant celle-ci, différents scénarios sont définis pour être quantifiés et apporter des éléments d'appréciation de la performance du système de stockage et de sa robustesse vis-à-vis des incertitudes résiduelles et du respect des objectifs de protection. Il est retenu au stade d'esquisse les scénarios suivants :

- le scénario d'évolution normale, en tant que scénario de base de l'évaluation de sûreté après fermeture ; ce scénario se décline en une « situation de référence » qui vise à évaluer la performance attendue du système de stockage tel que conçu et les incidences résiduelles sur la santé de l'homme en après fermeture, et une « situation enveloppe » destinée à montrer la robustesse du système de stockage en intégrant de manière conservative des incertitudes résiduelles et qui constitue ainsi une estimation conservative des impacts en situation d'évolution normale du stockage ;
- la démonstration de la robustesse du système de stockage est renforcée par l'évaluation de scénarios de déviation de l'évolution normale du système de stockage et de son environnement. À ce stade, parmi la liste des scénarios envisagés ou postulés de type SEA, WHAT-IF et SIHI (cf. Volume 8 du présent rapport), le scénario SEA de dysfonctionnement des scellements des galeries et liaisons surface-fond est retenu. En effet, ce scénario mobilise potentiellement la voie de transfert par les ouvrages par rapport au scénario d'évolution normale (*i.e.* Court-circuit potentiel de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien), plus particulièrement pour les radionucléides mobiles à vie longue ; son traitement permet d'évaluer la robustesse du système de stockage.

Les hypothèses afférentes à chacun de ces scénarios de sûreté après-fermeture sont définies pour chacune des deux architectures de l'installation souterraine à terminaison relatives à l'inventaire de réserve afférent. Hormis les termes sources propres des combustibles usés et des déchets FA-VL, en regard de la similitude des fonctionnements phénoménologiques du stockage et de son environnement géologique pour l'inventaire de référence et l'inventaire de réserve, les hypothèses associées à chacun des scénarios sont identiques à celles retenues pour l'inventaire de référence.

L'objectif est de vérifier que le stockage des colis de l'inventaire de réserve, au travers plus particulièrement de l'extension des zones de stockage (nombre de colis) et des caractéristiques propres des colis (inventaires radiologiques et en toxiques chimiques, modèles de relâchement des colis...) ne remet pas en cause la sûreté de l'INB Cigéo à long-terme. L'atteinte de cet objectif est tout d'abord analysée sur la base des enseignements de l'évaluation du fonctionnement phénoménologique du stockage, et des analyses de sensibilité associées, présentés dans le volume 8 du présent rapport. Cette analyse est complétée par des évaluations quantitatives de la performance du système de stockage (à

partir d'indicateurs en lien avec les fonctions des composants du système de stockage) et des incidences sanitaires sur l'Homme (indicateurs de dose radiologique et d'impact toxique) dans le but de justifier de manière préliminaire la protection des intérêts dans le cas du stockage des colis de l'inventaire de réserve.

L'évaluation de la sûreté long terme après-fermeture du stockage des colis de l'inventaire de réserve est détaillée dans le document technique « Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve » (16).

4.3.1.4 L'analyse de l'évolution phénoménologique du système de stockage intégrant le stockage des colis de l'inventaire de réserve

L'évolution (*i.e.* Le fonctionnement) phénoménologique du système de stockage (par extension du stockage et du milieu géologique environnant) après sa fermeture est décrite dans le volume 7 du présent rapport, pour le cas du stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence.

Les principes directeurs de la conception du stockage des colis de l'inventaire de réserve étant les mêmes que ceux du stockage des colis de l'inventaire de référence, l'effet du stockage des colis de l'inventaire de réserve sur le fonctionnement phénoménologique du système de stockage des colis de l'inventaire de réserve s'appuie sur celui décrit pour le stockage des colis de l'inventaire de référence, en prenant en compte les caractéristiques propres des colis de l'inventaire de réserve. Il s'agit ainsi de souligner l'absence ou l'existence d'écarts, et dans ce cas l'importance de ces écarts.

4.3.1.4.1 Des fondamentaux inchangés par rapport à ceux du stockage de l'inventaire de référence

a) Des principes directeurs de la conception de l'installation souterraine inchangés

Les principes directeurs de la conception de l'installation souterraine du stockage suivants restent inchangés avec la prise en compte du stockage de colis de l'inventaire de réserve dans l'installation souterraine :

- un stockage situé dans la couche du Callovo-Oxfordien, à une profondeur de l'ordre de 500 mètres ;
- un stockage globalement plan ;
- un stockage avec une garde de Callovo-Oxfordien non endommagé mécaniquement en champ proche des ouvrages souterrains, d'au moins 50 mètres de part et d'autre des ouvrages souterrains, notamment les alvéoles de stockage ;
- un stockage globalement borgne ;

  La borgnitude mobilise ainsi des flux d'eau circulant dans le stockage qui viennent du Callovo-Oxfordien, donc des flux d'eau (très) faibles du fait de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien, limitant ainsi le transfert convectif de radionucléides par le stockage et favorise leur transfert (lent et limité) par le Callovo-Oxfordien. Dans ce cadre, toutes choses égales par ailleurs, un doublement de l'emprise de l'installation souterraine de l'INB Cigéo se traduirait au maximum par une augmentation d'un facteur environ 2 à 3 du flux d'eau au sein du stockage. Ce facteur d'augmentation est à mettre en perspective des faibles flux d'eau mis en jeu du fait de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien ;
- un regroupement de la base des liaisons surface-fond, qui limite les effets de drain hydraulique par les galeries de stockage ;
- des alvéoles de stockage de grande longueur favorisant le transfert des radionucléides vers le Callovo-Oxfordien (*i.e.* Effet de pompe par le Callovo-Oxfordien, du fait de la grande surface d'échange offerte avec le Callovo-Oxfordien et du transfert par diffusion dominant dans le Callovo-Oxfordien) puis au sein du Callovo-Oxfordien (par diffusion, donc lent et limité dans le temps et l'espace) ;

- la séparation des typologies de colis de déchets dans des quartiers distincts :
  - ✓ les colis de combustibles usés sont stockés dans un quartier propre, dans le prolongement de celui des colis de déchets HA de l'inventaire de référence ;
  - ✓ les colis de déchets FA-VL de l'inventaire de réserve sont stockés dans un quartier propre, dans le prolongement de celui des colis de déchets MA-VL de l'inventaire de référence ;
- les règles de co-stockage physico-chimique ; les dispositions techniques sont similaires à celles retenues pour le co-stockage des colis de déchets MA-VL de l'inventaire de référence.

  Ces deux dernières dispositions de conception limitent les interactions entre les typologies de déchets. Elles favorisent une quasi-indépendance de fonctionnement phénoménologique de chaque quartier de stockage et de chaque ouvrage (galerie, alvéole de stockage, scellement) à l'intérieur d'un quartier, et également des liaisons surface-fond et des galeries de liaison scellées ;
- des positionnements respectifs des quartiers de stockage par rapport aux liaisons surface-fond :
  - ✓ en aval hydraulique de la direction des écoulements dans l'Oxfordien carbonaté pour la zone de stockage HA (quartiers de stockage HA et de combustibles usés) ;
  - ✓ en amont hydraulique pour la zone de stockage MA-VL (quartiers de stockage MA-VL et FA-VL).

  Cette disposition favorise la limitation du transfert potentiel des radionucléides et des substances toxiques chimiques des quartiers de stockage HA et de combustibles usés par la « voie ouvrages souterrains » vers les ouvrages de liaison surface-fond, et corrélativement leur transfert par le Callovo-Oxfordien ;
- des caractéristiques hydrauliques des ouvrages souterrains fermés, en particulier les scellements, qui permettent « d'isoler hydrauliquement » le stockage (au global et par quartier) tout en laissant passer les gaz. Cela limite la circulation d'eau au sein du stockage, favorise le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques par le Callovo-Oxfordien et préserve les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien (limitation de la pression maximale de gaz, bien en deçà des conditions d'une fracturation au gaz du Callovo-Oxfordien en grand) ;
- des exigences thermiques visant à limiter les effets de la température sur les performances des composants du système de stockage (ex. Température maximale dans le Callovo-Oxfordien inférieure à 100 °C au droit des alvéoles de stockage de déchets exothermiques, comme les déchets HA et les combustibles usés) ou à rester dans un domaine de température maitrisé (ex. Relâchement des radionucléides des colis de stockage de déchets HA et de combustibles usés pour des températures inférieures à 70 °C).

b) Des principes de conception d'alvéoles de stockage et de colis de stockage inchangés par rapport à ceux de l'inventaire de référence

Les colis de combustibles usés comme les colis de déchets HA sont stockés dans des micro-tunnels borgnes avec un chemisage en acier bas carbone et après mise en conteneur de stockage en acier bas carbone.

Les colis de déchets FA-VL comme les colis de déchets MA-VL dans le quartier de stockage MA-VL, sont stockés dans des tunnels d'environ 500 mètres de long.

4.3.1.4.2 Des caractéristiques des colis de l'inventaire de réserve ne générant pas d'interactions particulières avec les autres composants du système de stockage

La nature même des colis de l'inventaire de réserve, associée aux dispositions de conception précitées, ne génère pas de processus d'interactions physico-chimiques particuliers vis-à-vis des autres composants du système de stockage par rapport aux déchets de l'inventaire de référence (Callovo-Oxfordien, composants en béton, ouvrages de fermeture à base d'argile).

En effet, les colis de l'inventaire de réserve sont plutôt neutres ou de nature physico-chimique similaire aux déchets de l'inventaire de référence.

4.3.1.4.3 Des grands traits de l'évolution phénoménologique du système de stockage inchangés par rapport à celle de l'inventaire de référence

Au regard des grands invariants précités, l'évolution phénoménologique du système de stockage pour l'inventaire de réserve est similaire à celle du système de stockage pour l'inventaire de référence. Les grands processus de cette évolution tels que décrit pour le stockage de l'inventaire de référence ne sont pas modifiés (cf. Volume 7 du présent rapport). En effet, il s'agit :

- soit de **processus à grande échelle (site, région...)**, comme les **évolutions géodynamiques interne (tectonique) et externe (évolution du climat).**

  Ces évolutions sont indépendantes du stockage et n'induisent pas d'effets particuliers ou spécifiques sur le stockage de l'inventaire de réserve par rapport à l'inventaire de référence. Il en va de même pour leurs effets sur l'évolution des écoulements hydrogéologiques en grand, notamment dans les formations géologiques encaissantes du Callovo-Oxfordien (Oxfordien carbonaté et Dogger) ;

- soit de **processus « locaux »**, affectant les **ouvrages souterrains**, le **champ proche des ouvrages souterrains** et des **quartiers** ou le **Callovo-Oxfordien au droit des quartiers**, comme :
  - ✓ l'évolution chimique des ouvrages souterrains, notamment les alvéoles de stockage et les scellements, et du milieu géologique environnant (interaction avec le béton et les aciers...) ;
  - ✓ l'évolution mécanique des ouvrages souterrains et du milieu géologique environnant. Elle est pilotée par les interactions roche/ouvrages. Elle est donc peu affectée par la typologie des colis stockés au regard des mêmes choix de conception au sens large pour le stockage de l'inventaire de réserve et celui de l'inventaire de référence, et de l'absence de spécificités marquées en termes d'interactions physico-chimiques des colis de l'inventaire de réserve avec les autres composants, par rapport aux déchets de l'inventaire de référence ;
  - ✓ le transitoire thermique et thermo-hydromécanique du Callovo-Oxfordien au droit des quartiers HA et de combustibles usés. Le choix de mêmes exigences thermiques conduit de facto à des évolutions similaires entre le stockage de l'inventaire de réserve et celui de l'inventaire de référence ;
- soit de **processus à l'échelle du stockage et du Callovo-Oxfordien en grand autour du stockage**, comme :
  - ✓ le transitoire hydraulique-gaz dans l'installation souterraine, lié à la resaturation en eau des ouvrages souterrains par le Callovo-Oxfordien et, à la production d'hydrogène dans le stockage majoritairement par la corrosion anoxique des composants métalliques et sa migration dans le Callovo-Oxfordien à l'état dissous par diffusion.

    Les architectures de l'installation souterraine pour le stockage de l'inventaire de réserve conduisent à une augmentation des quantités de métaux, notamment d'acier (cf. Conteneur de stockage des combustibles usés, chemisage des alvéoles de stockage des combustibles usés, armatures des bétons des alvéoles de stockage de colis de déchets MA-VL et FA-VL et des galeries). La production de gaz est donc intrinsèquement plus importante. Les cinétiques de production d'hydrogène sont toutefois similaires compte tenu des mêmes environnements chimiques. Les quartiers de stockage supplémentaires offrent des volumes d'expansion au gaz et des surfaces d'échanges avec le Callovo-Oxfordien supplémentaires. Les scellements assurent comme pour le stockage de l'inventaire de référence une fonction de « laisser passer le gaz ».

    Le transitoire hydraulique-gaz pour le stockage de l'inventaire de réserve présente donc une même dynamique que celui pour le stockage de l'inventaire de référence, en particulier en termes de pression maximale de gaz, de migration majoritaire du gaz par le Callovo-Oxfordien à l'état dissous, et d'organisation des écoulements d'eau et de gaz au sein du stockage jusqu'au retour à un état tout saturé et un quasi-équilibre hydraulique du stockage et du Callovo-Oxfordien environnant ;
  - ✓ l'évolution des écoulements d'eau au sein du stockage et à l'échelle du Callovo-Oxfordien après l'atteinte de l'état tout saturé et le retour à un état de quasi-équilibre hydraulique.

L'évolution des écoulements à grande échelle dans les formations géologiques sus et sous-jacentes du Callovo-Oxfordien indépendante du stockage et la présence des scellements font que l'organisation générale ainsi que les flux et les vitesses des écoulements d'eau au sein du stockage et dans le Callovo-Oxfordien restent similaires à ceux pour le stockage de l'inventaire de référence.

Les écoulements d'eau au sein du stockage restent très faibles. Ils restent pilotés par la très faible perméabilité du Callovo-Oxfordien et les faibles gradients hydrauliques dans le Callovo-Oxfordien liés aux charges hydraulique dans l'Oxfordien carbonaté et le Dogger.

Les scellements étant efficaces, il n'y a pas plus d'effet de drain hydraulique du Callovo-Oxfordien par le stockage de l'inventaire de réserve du fait de quartiers supplémentaires que pour le stockage de l'inventaire de référence.

On notera, comme cela sera développé plus avant, que même en cas de défaillance des scellements, les quartiers de stockage supplémentaires par rapport au stockage de l'inventaire de référence ne conduiraient qu'à une augmentation des flux d'eau au sein du stockage d'un facteur d'environ 2 à 3 au maximum, pour des flux déjà très faibles car venant du Callovo-Oxfordien avec une très faible perméabilité (à titre illustratif, le quartier de déchets FA-VL serait similaire à celui des déchets MA-VL donc il drainerait une quantité d'eau similaire à celle de ce dernier).

Au regard de certaines spécificités des colis de l'inventaire de réserve ou d'effet d'échelle, les durées de certains grands processus transitoires peuvent varier mais elles restent du même ordre de grandeur que celles pour l'inventaire de référence, compte tenu notamment de l'adoption de mêmes dispositions de conception. Cela concerne principalement le transitoire thermique du fait d'une décroissante du dégagement de chaleur des combustibles usés plus lente que celle des déchets HA : les dates d'atteinte des paroxysmes thermiques, de retour à une température de 70 °C, et de retour à une température proche de la température géothermale naturelle sont un peu plus grandes pour les combustibles usés, mais elles restent dans les mêmes ordres de grandeur et petites à l'échelle du million d'années de l'évaluation du fonctionnement phénoménologique du stockage (respectivement de quelques dizaines à quelques dizaines de milliers d'années).

4.3.1.4.4 Une même préservation des caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien par rapport à l'inventaire de référence

Les mêmes dispositions de conception au sens large et les mêmes évolutions phénoménologiques entre le stockage de l'inventaire de réserve et celui de l'inventaire de référence ne conduisent pas à de nouvelles perturbations susceptibles de modifier les caractéristiques qui sous-tendent les performances du Callovo-Oxfordien, pilier central de la sûreté après fermeture et à long terme. Cela concerne en particulier :

- les processus chimique et mécanique d'interactions (par exemple, perturbation alcaline par les composants du stockage en béton, ou endommagement mécanique lié à la construction des ouvrages) : ils restent des processus de champ proche et sont identiques ;
- les processus hydromécaniques du Callovo-Oxfordien en grand : le transitoire thermique et le transitoire hydraulique-gaz, comme pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence ne génèrent pas d'endommagement mécanique du Callovo-Oxfordien en grand, en particulier une fracturation en grand.

La fonction « Préserver les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien et des composants ouvragés contribuant à la sûreté après fermeture » reste satisfaite (cf. L'analyse détaillée dans le document qui présente les « Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve » (16)). Ces caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien restent toujours :

- une forte épaisseur (entre environ 140 mètres et 160 mètres sur la ZIOS) ;
- une très faible perméabilité à l'eau du Callovo-Oxfordien ;

- des écoulements d'eau très faibles du fait de la faible perméabilité et du faible gradient de charge hydraulique vertical au sein du Callovo-Oxfordien (de quelques 1/100e à quelques 1/10e de $m.m^{-1}$, selon l'évolution géodynamique considérée et/ou la prise en compte de la surpression hydraulique naturelle) ;
- des capacités de rétention élevées du Callovo-Oxfordien, notamment pour la très grande majorité des radionucléides, en particulier les actinides et les lanthanides ;
- à l'échelle du Callovo-Oxfordien, la diffusion comme mécanisme dominant du transfert des radionucléides, avec des temps de transfert des solutés élevés, de plusieurs centaines de milliers d'années pour les solutés sans rétention dans le Callovo-Oxfordien, depuis le stockage vers le toit ou le mur du Callovo-Oxfordien[34].

4.3.1.4.5 Un même comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques à l'échelle du stockage et du milieu géologique par rapport à l'inventaire de référence

Du fait de leurs caractéristiques intrinsèques, et indépendamment de contextes physico-chimiques en stockage similaires avec ceux des déchets de l'inventaire de référence, les combustibles usés (par extension les colis de stockage) et les déchets FA-VL présentent des relâchements des radionucléides et substances toxiques chimiques (*i.e.* Termes sources) qui leur sont propres.

Toutefois, en regard de la similitude des évolutions phénoménologiques du stockage des colis de l'inventaire de réserve et de celui des colis de déchets de l'inventaire de référence, incluant la préservation des caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien, les grands déterminants du comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques à l'échelle du stockage et du milieu géologique ne sont pas modifiés. Ainsi comme pour le stockage de l'inventaire de référence :

- l'essentiel des radionucléides (notamment les actinides et les lanthanides) et des substances toxiques chimiques restent confinés dans les alvéoles de stockage et en champ proche, du fait de leur faible solubilité et leur forte rétention sur les matériaux du stockage ou les argilites du Callovo-Oxfordien ;
- la couche de Callovo-Oxfordien est la voie de transfert privilégiée de ces radionucléides et une quantité minime migre par le stockage ;
- seuls quelques radionucléides mobiles à vie longue (l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79), peuvent migrer depuis les alvéoles dans le Callovo-Oxfordien jusqu'à son toit et son mur, mais de manière lente et atténuée dans le temps du fait des caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien précitées (temps de transfert par diffusion de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'années). Ils migrent ensuite dans les formations sus-jacente et sous-jacentes jusqu'aux exutoires.

Concernant le carbone 14 (le carbone 14 est présent dans les combustibles usés et les déchets FA-VL graphites[35]), une fraction de ce dernier est sous forme gazeuse et peut migrer depuis les alvéoles de stockage jusqu'aux liaisons surface-fond durant le transitoire hydraulique-gaz. Toutefois, comme pour l'inventaire de référence, les longues distances de transfert depuis les alvéoles de stockage de combustibles usés et de déchets FA-VL jusqu'aux liaisons surface fond, la convection limitée dans les galeries, l'équilibre entre le carbone 14 sous forme gazeuse et le carbone 14 dissous (loi de Henry), et l'effet de pompe diffusive par le Callovo-Oxfordien, font que la majorité du carbone 14 gazeux migre par le Callovo-Oxfordien à l'état dissous par diffusion. Cette migration lente, d'environ plusieurs centaines de milliers d'années, permet une décroissance radioactive très significative (la période radioactive du Carbone 14 étant d'environ 5700 ans) de sorte que la quantité de carbone 14 arrivant au toit et au mur du Callovo-Oxfordien est négligeable.

[34] Ces valeurs sont issues de la connaissance acquise depuis plus de 25 ans sur la couche du Callovo-Oxfordien.
[35] L'inventaire de réserve introduit une augmentation de la fraction de carbone 14 sous forme gazeuse.

Synthèse de l'analyse de l'évolution phénoménologique du système de stockage pour le stockage des colis de l'inventaire de réserve

En conservant les mêmes principes directeurs de conception, et en préservant les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien, quelles que soient les architectures d'ensemble considérées, le système de stockage des colis de l'inventaire de réserve présente un fonctionnement phénoménologique similaire au système de stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence (mêmes processus et ordres de grandeur associés - nature, durée, amplitude, extension...).

Dans ce cadre, il en est de même pour le comportement des radionucléides et des substances toxiques chimiques.

4.3.1.5 L'analyse de la performance du système de stockage vis-à-vis du stockage des colis de l'inventaire de réserve

» NOTE IMPORTANTE

Les principaux enseignements tirés des évaluations de scénarios d'évolution du stockage réalisées pour le stockage de l'inventaire de référence et sur les études de sensibilités associées (cf. Chapitres 7, 8 et 11 du volume 8 du présent rapport) montrent que la performance du système de stockage par rapport aux fonctions de sûreté « s'opposer à la circulation de l'eau », « limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage » et « retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques » est assurée, c'est-à-dire que la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien reste la voie principale même en cas de dysfonctionnement de tous les scellements, du fait en particulier :

- des caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien, parmi lesquelles :
  - ✓ la faible perméabilité à l'eau du Callovo-Oxfordien et le faible gradient de charge hydraulique vertical dans le Callovo-Oxfordien qui garantissent de faibles écoulements d'eau au sein des ouvrages souterrains, une diffusion dominante dans le Callovo-Oxfordien et une prédominance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien ;
- des choix de conception de l'architecture limitant les écoulements au sein des ouvrages souterrains, et en particulier le regroupement des liaisons surface-fond à leur base dans la couche du Callovo-Oxfordien, la borgnitude des quartiers de stockage et la longueur des alvéoles de stockage (permettant un effet de « pompe diffusive » vers le Callovo-Oxfordien).

En cas de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface, l'évolution du régime hydraulique dans le stockage reste limitée par rapport à celle du scénario d'évolution normale, et la couche du Callovo-Oxfordien reste la voie de transfert principale avec des flux de radionucléides en sortie au toit de la couche du Callovo-Oxfordien identiques à ceux obtenus en scénario d'évolution normale.

La couche du Callovo-Oxfordien reste la voie de transfert dominante, même en tenant compte des variabilités et incertitudes sur d'une part, certaines propriétés du milieu géologique vis-à-vis de la migration des radionucléides selon les voies de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien et par les ouvrages, et d'autre part, le remplissage des alvéoles MA-VL et les caractéristiques de certains composants de l'architecture souterraine.

Pour vérifier que la performance du système de stockage est préservée vis-à-vis d'éventuels effets engendrés par le stockage des colis de l'inventaire de réserve, l'analyse s'appuie sur les enseignements tirés des évaluations quantitatives de scénarios d'évolution du stockage réalisées pour le stockage de l'inventaire de référence présentés dans l'encadré ci-avant. Quelques valeurs illustrant la performance du stockage des colis de l'inventaire de réserve au regard des indicateurs intermédiaires sont présentées de façon illustrative. Ces valeurs sont issues du document qui détaille les « Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve » (16). Afin d'illustrer à la fois la performance attendue du système de stockage vis-à-vis des incidences résiduelles sur la santé de l'homme en après fermeture en cas de stockage de l'inventaire de réserve, et de présenter une estimation enveloppe de ces incidences en intégrant de manière conservative les incertitudes résiduelles à la situation d'évolution normale du stockage, les illustrations sont faites en présentant les résultats pour les deux situations du scénario d'évolution normale (respectivement de référence et enveloppe).

La performance du stockage de l'inventaire de réserve s'apprécie pour les (sous)fonctions ci-après.

4.3.1.5.1 La (sous)fonction « s'opposer à la circulation de l'eau » est évaluée au regard de l'analyse des vitesses d'écoulement de l'eau et des débits d'eau dans les ouvrages remblayés et scellés

Le schéma hydraulique au sein de l'installation souterraine pour le stockage de l'inventaire de réserve (scénario « SR1 + FA-VL » ou scénario « SNR enveloppe + FA-VL ») reste inchangé par rapport à celui de l'inventaire de référence. En effet, les propriétés hydrauliques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien (faible perméabilité et faible gradient de charge vertical) et l'efficacité des scellements des liaisons surface-fond limitent les capacités de drainage par le stockage, même en présence de quartier de stockage HA, combustibles usés ou FA-VL supplémentaire. En effet, malgré l'ajout de quartiers, et donc de surface de drainage du Callovo-Oxfordien, les écoulements dans le stockage restent très limités dans les différents quartiers de stockage, dans la zone centrale comprenant la base des liaisons surface-fond et dans les liaisons surface-fond. À titre d'illustration, un quartier de stockage FA-VL similaire à celui du quartier de stockage MA-VL conduirait à augmenter le flux drainé déjà très faible (bien inférieur au m^3/an) au plus d'un facteur 2. De ce fait, le transfert des solutés reste majoritairement diffusif dans les ouvrages et la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien reste favorisée. Le champ de charges hydrauliques dans la couche du Callovo-Oxfordien reste également peu perturbé par le drain hydraulique que constitue l'installation souterraine.

Comme pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence, la zone de stockage regroupant les alvéoles de stockage MA-VL et FA-VL est située en « amont hydraulique » par rapport aux liaisons surface-fond vis-à-vis des écoulements dans l'Oxfordien. Elle contribue ainsi à l'essentiel de l'eau drainée par les liaisons surface-fond. Du fait de son éloignement de plusieurs centaines de mètre *a minima* de la base des liaisons surface-fond, et de son extension limitée par rapport au quartier de stockage MA-VL, la contribution hydraulique du quartier de stockage FA-VL, déjà faible pour les raisons précitées, est très faible par rapport à celle du quartier de stockage MA-VL. Comme pour l'architecture de l'inventaire de référence, le positionnement des quartiers de stockage HA et CU, situés en aval hydraulique, conduit également à ce que leur contribution hydraulique aux liaisons surface-fond est négligeable.

Par conséquent, les débits d'eau sortant des liaisons surface-fond, évalués entre environ 250 litres à 400 litres par an sont du même ordre de grandeur que ceux évalués pour l'architecture du stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence (environ 300 litres par an, chapitre 6 du volume 8 du présent rapport).

Comme pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence, les effets d'un dysfonctionnement des scellements par l'interface (scellements des liaisons surface-fond uniquement, scellements des galeries uniquement ou tous les scellements) sur le régime hydraulique dans les ouvrages souterrains restent limités, du fait des dispositions de conception et des propriétés favorables du Callovo-Oxfordien qui sont conservées (cf. Chapitre 8.3.1.1 du volume 8 du présent rapport) auxquelles s'ajoutent la performance hydraulique des noyaux argileux des scellements.

4.3.1.5.2 La (sous)fonction « limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage » est évaluée au travers du flux, ou débit, molaire (ou massique) instantané des radionucléides et substances toxiques chimiques en sortie du Callovo-Oxfordien

Cet indicateur repose sur des modèles de relâchement propres à chacune des familles de colis ainsi que la prise en compte d'éventuels phénomènes de rétention dans l'alvéole (majoritairement apportés par la présence des composants cimentaires au sein des alvéoles de stockage MA-VL et FA-VL). Tel qu'introduit au chapitre 4.2.1 du présent volume (*i.e.* Les enjeux pour la sûreté liés aux caractéristiques intrinsèques des colis) et repris au chapitre 4.3.1.4 du présent volume, les caractéristiques différentes des combustibles usés et des déchets de graphite FA-VL peuvent conduire à des cinétiques de relâchement qui diffèrent de celles des familles de colis de déchets de l'inventaire de référence.

Dans chacune des situations étudiées du scénario d'évolution normale (référence et enveloppe), les termes sources des différents radionucléides et substances toxiques chimiques sont établis en considérant les inventaires associés et les modèles de relâchement des différents sous-ensembles physico-chimiques (matrice céramique, gaines, éléments de structure), dont la durée de relâchement est associée à leur épuisement physique.

En situation enveloppe (cette représentation majore le transfert et minimise la durée de relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis stockés jusqu'aux exutoires puis à l'homme. Elle constitue par ce choix d'hypothèses et de données conservatives, la limite du domaine d'évolution normale du système de stockage et de son environnement et conduit par cette définition à une borne supérieure de l'impact cumulé des incertitudes résiduelles de connaissance en évolution normale) :

- pour les familles de combustibles usés, après la perte d'étanchéité du conteneur de stockage[36], le modèle de relâchement retenu de manière prudente aboutit à une durée globale de relâchement des trois radionucléides mobiles à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) (i) pour la matrice céramique, de quelques dizaines d'années (modèle de dissolution radiolytique) à quelques centaines d'années (modèle électrochimique) (ii) pour les gaines et éléments de structure, à environ 6 000 ans.

  Par comparaison, le modèle de relâchement conduisant au relâchement le plus rapide[37] pour les colis de déchets HA correspond à une durée globale de relâchement du même ordre de grandeur (environ 2 000 ans).

  Toutes ces durées de relâchement peuvent être considérées comme un relâchement quasi labile à l'échelle du temps de transfert de l'ordre de 100 000 ans à 200 000 ans dans les gardes supérieures et inférieures de Callovo-Oxfordien sain. Un tel relâchement n'a donc aucune influence sur les temps d'atteinte des débits molaires maximaux au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 7 du volume 8 du présent rapport) ;
- pour les familles de déchets FA-VL, le relâchement est considéré comme quasi labile afin de couvrir l'ensemble des incertitudes de connaissances sur le comportement des déchets FA-VL ;
- pour les familles de colis HA et MA-VL de l'invertaire de réserve, le relâchement est identique à celui considéré pour l'inventaire de référence.

Par conséquent, *en situation enveloppe*, les temps d'atteinte des maximas de débit molaire des radionucléides mobiles à vie longue en sortie de la couche Callovo-Oxfordien restent inchangés par rapport à ceux de l'inventaire de référence. Les débits molaires maximaux sont proportionnels à l'inventaire en radionucléides mobiles à vie longue ; ainsi, par rapport à l'inventaire de référence (cf. Chapitre 2.2.3.1 du présent volume) :

---

[36] La durée minimale d'étanchéité du conteneur de stockage des combustibles usés après leur mise en stockage est prise à 500 ans comme pour le conteneur de stockage des colis de stockage HA (16).

[37] Le modèle de relâchement retenu pour la situation enveloppe du SEN est le modèle de vitesse de dissolution initiale, dit « $V_0.S$ », avec des valeurs conservatives des paramètres du modèle.

- pour les colis associés au scénario « SR1 + FA-VL », l'augmentation des débits molaires maximaux est *au prorata* du nombre de colis HA supplémentaires, soit globalement de l'ordre de 10 % à 20 % pour le chlore 36, l'iode 129 et le sélénium 79 ;
- pour les colis associés au scénario « SNR enveloppe + FA-VL », il n'y a globalement pas d'augmentation des débits molaires maximaux pour le chlore 36 et le sélénium 79, et une augmentation d'un facteur 24 pour l'iode 129.

En situation de référence (elle est définie en s'appuyant sur la connaissance scientifique et technologique acquise à date. En cohérence avec le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (21), elle couvre, en intégrant néanmoins des représentations conservatives, les événements les plus probables et se fonde sur le meilleur état des connaissances scientifiques et technologiques disponible issu de recherches menées depuis plus de 25 ans).

a) Pour les familles de combustibles usés

Le modèle de relâchement aboutit à une durée globale de relâchement des trois radionucléides mobiles à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) variable selon le type de combustible (MOX/UOX/URE) en se basant sur une perte d'étanchéité du conteneur de stockage de l'ordre de quelques milliers d'années.

- Concernant le relâchement de la matrice UO_2 ou $UPuO_2$:
  - ✓ pour les familles de colis MOX, la durée de relâchement de la matrice (comprenant environ 90 % de l'inventaire initial en MOX, dont une dizaine de % en labile) est de quelques dizaines à centaines d'années, quelle que soit le modèle retenu (radiolytique et électrochimique). Le niveau d'activité alpha des familles de colis MOX ne permettrait pas, au regard des temps d'étanchéité du conteneur, de bénéficier du modèle de dissolution classique, et d'un relâchement contrôlé par la solubilité de l'Uranium, soit des durées de relâchement de plusieurs dizaines de millions d'années ;
  - ✓ pour les familles de colis UOX, la durée de relâchement de la matrice (comprenant environ 90 % de l'inventaire initial en UOX, dont quelques % en labile), est :
    - de l'ordre de 1 000 ans, selon le modèle radiolytique,
    - de l'ordre de 4 000 ans pour environ 60 % de l'inventaire radiologique, puis de l'ordre de 100 millions d'années pour les 30 % de l'inventaire restant du fait du basculement à un modèle de dissolution classique contrôlé par la solubilité de l'Uranium, selon le modèle électrochimique.
  - ✓ pour les familles de colis URE, la durée de relâchement de la matrice (comprenant environ 90 % de l'inventaire initial en URE, dont quelques % en labile), est :
    - de l'ordre de 1 000 ans, selon le modèle radiolytique ;
    - de l'ordre de 100 millions d'années selon le modèle électrochimique ;
- Concernant le relâchement des gaines et des éléments de structure :

  La durée de relâchement s'effectue en quelques dizaines de milliers d'années (corrosion des alliages en zirconium et des composants en acier et nickel). En combinant les modèles de relâchement indiqués ci-avant :
  - ✓ selon le modèle de dissolution radiolytique, la totalité du relâchement par les colis de combustibles usés s'étale sur une durée de l'ordre de 10 000 ans ;
  - ✓ comme pour le relâchement des colis HA de l'inventaire de référence, cette durée est très inférieure au temps de transfert de l'ordre de 700 000 ans à 800 000 ans dans les gardes supérieures et inférieures de Callovo-Oxfordien sain, de sorte que la cinétique de relâchement n'a aucune influence sur les débits molaires maximaux des radionucléides mobiles à vie longue au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien ;

- ✓ selon le modèle électrochimique, la totalité du relâchement par les colis de combustibles usés est réalisée sur une durée au maximum de l'ordre de 10 000 ans pour 80 % de l'inventaire, et de l'ordre de 100 000 millions d'années pour les 20 % de l'inventaire restant. Au regard des temps de transfert dans la couche de Callovo-Oxfordien indiqués ci-avant, l'influence de la cinétique de relâchement concerne seulement 20 % de l'inventaire en CU, et les maximas de débits molaires des radionucléides mobiles à vie longue au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien sont pilotés par les 80 % de l'inventaire radiologique.

b) Pour les familles de déchets FA-VL

Le relâchement est considéré comme quasi labile en regard de la connaissance ; la faible proportion de radionucléides mobiles à vie longue par rapport aux autres familles de déchets, notamment MA-VL, conduit à ce que le relâchement de ces radionucléides par les colis de déchets FA-VL est négligeable devant celui des autres familles de colis.

Par conséquent, en situation de référence, comme pour les familles de colis associées à l'inventaire de référence, la cinétique de relâchement des colis associée à l'inventaire de réserve n'a, soit aucun effet sur les temps d'atteinte des maximas de débits molaires en sortie de Callovo-Oxfordien, soit une influence limitée pour environ 20 % de l'inventaire. Les augmentations de débits molaires maximales de radionucléides mobiles à vie longue au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien sont alors au maximum proportionnelles à l'augmentation de l'inventaire de réserve par rapport à l'inventaire de référence (cf. Chapitre 2.2.3.1 du présent volume) :

- pour les colis associés au scénario « SR1 + FA-VL », l'augmentation des débits molaires maximaux est *au prorata* du nombre de colis HA supplémentaires, soit globalement de l'ordre de 10 % à 20 % pour le chlore 36, l'iode 129 et le sélénium 79 ;
- pour les colis associés au scénario « SNR enveloppe + FA-VL », il n'y a pas d'augmentation des débits molaires maximaux pour le chlore 36 et le sélénium 79, et une augmentation d'un facteur 20 à 24 pour l'iode 129.

4.3.1.5.3 La (sous)fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques » est évaluée au travers des bilans (dans le stockage, la couche du Callovo-Oxfordien et/ou dans les formations encaissantes) et de la répartition des voies de transfert

Ces indicateurs permettent de quantifier les voies de transfert, plus particulièrement leur répartition :

- depuis les colis de déchets jusqu'aux toit et mur de la couche du Callovo-Oxfordien, en distinguant la voie de transfert « Callovo-Oxfordien » et la voie de transfert par les ouvrages ;
- dans les formations encaissantes jusqu'aux exutoires du Barrois, de l'Oxfordien (pompage dans la zone de fracturation diffuse et exutoire rivière de l'Ornain) et du Dogger (pompage dans la zone de fracturation diffuse).

Les évaluations du scénario d'évolution normale du stockage présentées au volume 8 du présent rapport apportent les enseignements suivants :

- comme pour les familles de colis de l'inventaire de référence, la majeure partie des radionucléides des familles de colis de l'inventaire de réserve reste confinée dans le stockage ou dans la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche du stockage sur le prochain million d'années. Seuls les radionucléides mobiles à vie longue (iode 129, chlore 36 et sélénium 79) arrivent en sortie de la couche du Callovo-Oxfordien[38] (en considérant des débits molaires significativement supérieurs à 10^{-10} mole par an) par la voie du Callovo-Oxfordien ou la voie des ouvrages ;
- concernant l'organisation des différentes voies de transfert des principaux radionucléides :
  - ✓ celle par le Callovo-Oxfordien reste très majoritaire devant celle par les ouvrages.

[38] Certains cations à vie longue (potassium 40, rubidium 87 et calcium 41) atteignent également cette valeur mais restent moins mobiles que les anions cités ci-avant.

L'ajout de quartiers supplémentaires dans le cadre de l'adaptabilité ne modifie pas la répartition des voies de transfert par rapport à l'architecture de l'inventaire de référence.

De même que pour les colis de déchets vitrifiés HA, les effets de la température sur le relâchement, le transfert et la rétention des radionucléides issus des combustibles usés, ont été pris en compte dans le traitement quantitatif des scénarios de sûreté. Bien qu'intrinsèquement plus pénalisante (durée, intensité) que celle liée aux colis HA, la durée du transitoire thermique des colis de combustibles usés reste très inférieure aux temps de transfert dans le Callovo-Oxfordien, et d'influence négligeable sur les flux de radionucléides au toit et au mur de la couche de Callovo-Oxfordien.

Aussi, comme pour l'inventaire de référence, les temps caractéristiques de transfert par diffusion dans les gardes inférieure et supérieure de la couche de Callovo-Oxfordien sain sont de l'ordre de 700 000 ans à 800 000 ans pour la situation de référence et de 100 000 à 200 000 ans pour la situation enveloppe. Il en résulte une atténuation du flux de radionucléides mobiles à vie longue en sortie de Callovo-Oxfordien par étalement dans le temps et l'espace et par décroissance radioactive.

✓ celle par les ouvrages vers les liaisons surface-fond (puits et descenderies) reste très minoritaire devant la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien.

Comme pour l'architecture associée à l'inventaire de référence, le transfert de radionucléides au sein des composants ouvragés se fait par diffusion dominante dans les quartiers et par codominance convection/diffusion dans la zone de soutien logistique. De ce fait, les débits molaires maximaux en sortie des liaisons surface-fond restent toujours très inférieurs de plusieurs ordres de grandeur à ceux de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien (de l'ordre de six ordres de grandeur pour la situation de référence et de deux à trois ordres de grandeur pour la situation enveloppe). En effet :

- le positionnement en aval hydraulique des écoulements des quartiers supplémentaires HA et/ou CU (avec leur inventaire) ne contribue pas à augmenter la quantité de radionucléides suivant la voie de transfert par les ouvrages et arrivant à la base des liaisons surface fond ;
- de même, l'éloignement d'un quartier de stockage FA-VL de la base des liaisons surface fond plus élevé que celui du quartier de stockage MA-VL, associé à un inventaire mobilisé en radionucléides mobiles à vie longue plus faible que celui des MA-VL, conduit à ce que le flux de radionucléides sortant par les liaisons surface-fond et provenant de la zone MA-VL + FA-VL n'est pas modifié par rapport à celui provenant de la zone MA-VL de l'inventaire de référence ou de l'inventaire de réserve.

Ainsi, comme pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence :

- la part de l'inventaire total initial en radionucléides mobiles à vie longue ayant atteint les limites (toit et mur) de la couche du Callovo-Oxfordien à un million d'années, est comprise, pour la situation de référence entre 10 % et 20 %, et pour la situation enveloppe, entre 20 % et 65 % selon le radionucléide considéré. L'autre part de cet inventaire est encore présente dans la couche du Callovo-Oxfordien du fait de ses caractéristiques favorables de retard et d'atténuation du transfert, par diffusion et décroissance radioactive selon la période ;
- les formations encaissantes (formations marneuses de l'Oxfordien et du Kimméridgien, horizons poreux de l'Oxfordien ou horizons poreux du Dogger) permettent une atténuation supplémentaire des débits molaires maximaux des différents radionucléides vers les exutoires. En effet, l'ajout de quartiers supplémentaires HA, CU et FA-VL dans le cadre de l'inventaire de réserve, ne modifie pas, par rapport à l'architecture de l'inventaire de référence, la nature des exutoires du milieu géologique à prendre en compte et les exutoires mobilisés par les radionucléides ;
- la part de l'inventaire total initial en radionucléides mobiles à vie longue ayant traversé les formations encaissantes pour atteindre les exutoires est, à l'échelle du million d'années, de l'ordre de quelques % pour la situation de référence et au maximum de l'ordre de 30 % pour la situation enveloppe (selon l'exutoire et le radionucléide considéré).

Par ailleurs, en cas de dysfonctionnement des scellements par leur interface (scellements des puits et des descenderies, et scellements des galeries), le comportement hydraulique et le transfert des radionucléides depuis les alvéoles de stockage vers les galeries sont identiques à ceux du stockage de l'inventaire de référence : les flux d'eau au sein stockage restent limités et la couche du Callovo-Oxfordien reste la voie de transfert principale. Ainsi, la présence de quartiers de stockage HA et CU supplémentaires ne conduit pas, même en cas de défaillance des scellements, à augmenter la voie de transfert par les liaisons surface-fond et le flux de radionucléides mobiles à vie longue en sortie du Callovo-Oxfordien est identique à celui du scénario d'évolution normale.

Enfin, et comme pour les éléments d'architecture et de conception associée à l'inventaire de référence, les études de sensibilité à différents paramètres de l'architecture montrent que des évolutions qui pourraient tout aussi bien advenir dans le cas du stockage de colis de l'inventaire de réserve (diminution de la distance entre la base des liaisons surface-fond et les alvéoles de stockage MA-VL, augmentation/réduction du diamètre des galeries de liaison, augmentation de la longueur des alvéoles de stockage HA et MA-VL...) garantissent toujours un fonctionnement du stockage conforme à l'attendu. Les résultats de ces études de sensibilité réalisées pour l'architecture de l'inventaire de référence sont transposables au fonctionnement du stockage des colis de l'inventaire de réserve.

Synthèse de l'analyse de la performance du système de stockage en après fermeture au regard du stockage des colis de l'inventaire de réserve

Comme pour l'architecture de stockage associée à l'inventaire de référence, du fait des caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien et des principes directeurs communs de la conception de l'architecture souterraine quel que soit l'inventaire considéré, la performance du système de stockage associée à l'inventaire de réserve relative aux fonctions de sûreté « s'opposer à la circulation de l'eau », « limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage » et « retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques » est également assurée.

Vis-à-vis de **la (sous)fonction « s'opposer à la circulation de l'eau »**, les quelques adaptations au niveau des ouvrages souterrains pour le stockage des colis de l'inventaire de réserve par rapport à l'architecture de l'inventaire de référence, ne modifient pas le régime hydraulique et les conditions de transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques dans les ouvrages souterrains qui restent majoritairement diffusives. L'essentiel de l'eau drainée transitant vers les liaisons surface-fond provient des quartiers de stockage MA-VL. Comme pour le quartier de stockage HA, la contribution hydraulique du quartier de stockage de combustibles usés est négligeable, du fait d'un positionnement en « aval hydraulique » de ce quartier vis-à-vis des écoulements horizontaux dans l'Oxfordien.

Vis-à-vis de **la (sous)fonction « limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage »**, de même que pour l'inventaire de référence, les flux de radionucléides mobiles à vie longue arrivant aux bornes de la couche de callovo-Oxfordien sont globalement proportionnels liés aux inventaires radiologiques stockés.

Vis-à-vis de **la (sous)fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques »**, et comme pour l'inventaire de référence, la voie de transfert principale est la couche du Callovo-Oxfordien. Les temps de transfert par diffusion depuis les alvéoles de stockage sont identiques à ceux de l'inventaire de référence pour le scénario d'évolution normale, de l'ordre de 100 000 ans à 200 000 ans pour la situation enveloppe, et de 700 000 ans à 800 000 ans pour la situation de référence. En un million d'années, la part de l'inventaire total initial en radionucléides mobiles à vie longue ayant atteint les exutoires reste inférieure à quelques % pour la situation de référence et 30 % pour la situation enveloppe, quel que soit le radionucléide considéré.

4.3.1.6 Les incidences sanitaires sur l'Homme

Le rapport intermédiaire transmis en 2019 à la Direction générale de l'énergie et de climat présentant le « Contenu des études relatives à l'adaptabilité de Cigéo au stockage des déchets de l'inventaire de réserve » (9), notamment vis-à-vis de l'après fermeture, prévoit, en complément des développements présentés précédemment dans ce chapitre 4.3.1 du présent volume, une évaluation de l'incidence sanitaire sur l'homme à long terme les scénarios suivants :

- le scénario d'évolution normale ;
- le scénario SEA de dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface (cf. Volume 8 du présent rapport).

Ils sont évalués pour chacune des architectures illustratives retenues au titre de l'adaptabilité. Ils sont synthétisés ci-après et présentés en détail dans le document cité en référence « Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve » (16). Celui-ci précise notamment l'ensemble des résultats obtenus pour les différentes biosphères, exutoires et classes d'âge évalués.

Cette évaluation est présentée, en ce qui concerne l'évolution normale du stockage, à la fois pour les situations de référence et enveloppe. Ceci permet d'illustrer à la fois les incidences résiduelles sur la santé de l'homme en après fermeture en cas de stockage de l'inventaire de réserve, pour les événements les plus probables au regard de la connaissance disponible, et de présenter une estimation enveloppe de ces incidences en intégrant de manière conservative les incertitudes résiduelles.

» LES CONSERVATISMES DE LA SITUATION ENVELOPPE DU SCENARIO D'EVOLUTION NORMALE (SEN)

Comme indiqué au volume 8 du présent rapport, les principes sur lesquels repose la situation enveloppe sont les suivants :

- le choix des hypothèses et données correspondant aux exigences applicables aux composants du système de stockage pour l'après fermeture. Les valeurs assignées à ces exigences applicables sont retenues ;
- pour les composants ouvragés qui ne font pas l'objet d'exigences, et pour les composants naturels (la couche du Callovo-Oxfordien et les formations encaissantes), des choix de sûreté ***conservatifs*** afin de couvrir l'ensemble des incertitudes résiduelles de connaissance. Cette représentation permet de majorer le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis stockés jusqu'à la biosphère. De manière pratique, cela conduit à sélectionner parmi l'ensemble des données disponibles reposant sur une analyse/expertise scientifique des données existantes, les valeurs de paramètres, hautes ou basses, dans la gamme de valeurs disponible (en excluant les valeurs extrêmes qui n'ont pas de réalité physique).

  La situation enveloppe représente ainsi la limite (« conservative ») du scénario d'évolution normale en termes d'une part de performances des composants ouvragés qui font l'objet d'exigences définies pour le long terme en après fermeture et, d'autre part de représentation de la couche du Callovo-Oxfordien et de ses différentes caractéristiques. Spécifiquement pour la couche du Callovo-Oxfordien, pilier de la sûreté après fermeture, la situation enveloppe du scénario d'évolution normale retient un cumul de valeurs conservatives appliquées à la totalité de la couche du Callovo-Oxfordien pour les différents paramètres la caractérisant (coefficients de diffusion effectifs des solutés, coefficients de sorption, conductivité hydraulique à l'eau…). Elle conduit par cette définition à une borne supérieure de l'impact cumulé des incertitudes résiduelles de connaissance en évolution normale.

L'évaluation de l'incidence sanitaire sur l'homme répond à l'objectif défini par l'article L. 542-1 du code de l'environnement au sujet du *« respect de la protection de la santé des personnes, de la sécurité et de l'environnement »* et au guide de sûreté n° 1 de l'ASN (19).

4.3.1.6.1 Le cas du stockage des colis de déchets HA et MA-VL (allongement de la durée de fonctionnement du parc cumulés) cumulé avec le stockage des déchets FA-VL

Pour le **cas du stockage des colis de déchets HA et MA-VL** induits par l'allongement de la durée de fonctionnement du parc **associé à celui des colis de déchets FA-VL (SR1 + FA-VL)**, les évaluations quantitatives montrent les grandes lignes suivantes :

- comme pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence, les radionucléides et substances toxiques chimiques se trouvent encore dans le stockage et le Callovo-Oxfordien en champ proche du stockage avant 10 000 ans[39] ;
- sur le très long terme (au-delà de 200 000 ans pour la situation enveloppe et proche du million d'années pour la situation de référence), par rapport à l'inventaire de référence, les incidences sanitaires maximales sur l'homme augmentent et ce dans la proportion de l'augmentation des inventaires en radionucléides mobiles à vie longue (environ 10 % à 15 %), en lien avec le nombre de colis supplémentaires stockés plus élevé.

Pour la situation de référence, les impacts radiologiques sont de l'ordre au maximum de 0,5 $\mu Sv.an^{-1}$ à 2 $\mu Sv.an^{-1}$ pour l'exutoire de pompage dans la zone de fracturation diffuse du Dogger en considérant la classe d'âge enfant associée à une biosphère chaude. Ils sont inférieurs d'environ deux ordres de grandeur à la valeur de référence de 0,25 $mSv.an^{-1}$ citée dans le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (21).

Pour la situation enveloppe, les impacts radiologiques des radionucléides sont augmentés, par rapport à l'inventaire de référence, *au prorata* de l'inventaire supplémentaire mobilisé, de 10 % à 20 % selon le radionucléide. Les impacts radiologiques restant pilotés par le sélénium 79 des colis HA, les doses, pour la classe d'âge adulte (biosphère tempérée) sont au plus de l'ordre de 0,06 $mSv.an^{-1}$ pour l'exutoire de pompage dans la zone de fracturation diffuse et/ou les failles de l'Oxfordien et de l'ordre de 0,02 $mSv.an^{-1}$ pour l'exutoire de pompage dans la zone de fracturation diffuse du Dogger et dans les calcaires du Barrois. Dans une moindre mesure, la rivière Ornain, exutoire naturel identifié en situation enveloppe en considérant une évolution géodynamique maximaliste conjuguant érosion et surrection enveloppe, les valeurs maximales de dose sont inférieures d'environ deux ordres de grandeur à celles obtenues pour les autres exutoires en lien avec la dilution importante de cet exutoire rivière, soit de l'ordre de 0,16 $\mu Sv.an^{-1}$.

À titre prospectif dans le cadre de la présente étude d'adaptabilité à l'inventaire de réserve, conformément à la démarche « biosphère » pour la période long terme après fermeture (cf. Chapitre 4.1.2 du volume 8 du présent rapport), et comme pour l'évaluation menée pour l'inventaire de référence, des évaluations radiologiques sont réalisées pour un groupe de référence hypothétique multi-activités notamment les classes d'âge enfant de 10 ans et enfant de 1 an en supposant que les régimes alimentaires au-delà de 200 000 ans (aux dates d'atteintes des maximas) sont ceux observés actuellement. Pour l'exutoire de pompage dans la zone de fracturation diffuse dans l'Oxfordien, et pour le cas de biosphère chaude, les valeurs maximales observées, à 600 000 ans, sont légèrement supérieures et atteignent respectivement 0,23 $mSv.an^{-1}$ et 0,29 $mSv.an^{-1}$ pour les enfants de 10 ans et 1 an, principalement par le sélénium 79. Ces valeurs de dose maximale, qui sont associées à un ensemble d'hypothèses enveloppes maximisant le relâchement (terme source en équivalent labile), la géochimie et le transfert des radionucléides dans tous les compartiments (ouvrages, Callovo-Oxfordien, formation encaissantes et biosphère) restent à des niveaux du même ordre que la valeur de référence de 0,25 $mSv.an^{-1}$ considérée pour la période au-delà de 10 000 ans.

[39] Conformément à ce qui est requis par le guide de sûreté de 2008 de l'ASN (19) : *« La stabilité [...] du milieu géologique devant [...] être démontrée pour une période d'au moins 10 000 ans, la valeur des résultats des prévisions portant sur cette période devrait pouvoir être attestée de façon objective, notamment sur la base d'études d'incertitudes explicites. La contrainte de dose de 0,25 mSv/an sera retenue pour vérifier que la conception du stockage satisfait l'objectif fondamental de sûreté. ».*

Synthèse des principaux résultats des évaluations à long terme pour le cas d'architecture illustrative « SR1 + FA-VL »

Par rapport à l'inventaire de référence, l'inventaire de réserve lié à l'allongement de la durée de fonctionnement du parc conduit à une augmentation de 10 000 colis de déchets vitrifiés de type CSD-V et 120 colis C1PG^{SP} supplémentaires dans le stockage. Associé à la prise en compte de colis de déchets FA-VL, cela conduit à une augmentation de l'inventaire des trois principaux anions mobiles à vie longue qui font l'impact radiologique à long terme, d'un facteur entre 1,1 et 1,2, soit environ :

- 16 % pour l'iode 129 ;
- 17 % pour le chlore 36 ;
- 10 % pour le sélénium 79.

Le stockage des colis de l'inventaire de réserve au sein de l'architecture illustrative (SR1 + FA-VL) n'entraine pas de modification du comportement de ces radionucléides quant à leur transfert au sein du système de stockage vers la biosphère. Les incidences sanitaires sur l'homme liées au transfert potentiel de radionucléides aux exutoires sont ainsi dépendantes des inventaires en iode 129, chlore 36 et sélénium 79 présents dans les colis.

Sur un million d'années, les parts des inventaires initiaux de ces trois radionucléides mobiles à vie longue ayant atteint les limites (toit et mur) de la couche du Callovo-Oxfordien et les différents exutoires sont quasiment inchangées par rapport à celles pour le stockage des colis de l'inventaire de référence. Les dates d'occurrence des maximums de débits molaires à chaque étape du transfert sont également du même ordre de grandeur quel que soit le stockage considéré.

Sur le très long terme, par rapport à l'incidence sanitaire évaluée pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence, celle estimée pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de réserve augmente du même ordre de grandeur que l'augmentation des inventaires en radionucléides liée à celle du nombre de colis supplémentaires stockés (environ 15 % en situation enveloppe).

Elle est de l'ordre du microsievert par an en situation de référence du scénario d'évolution normale. En situation enveloppe, fondée sur des hypothèses conservatives, elle reste faible et du même ordre de grandeur que celle déterminée dans le cas du stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence pour la situation enveloppe du SEN et avec un maximum à des horizons de temps très lointains, au-delà de 500 000 ans. De même que pour l'inventaire de référence, les incidences sanitaires restent liées au sélénium 79.

4.3.1.6.2 Le cas du stockage des combustibles usés cumulé avec le stockage des colis de déchets FA-VL

Les évaluations quantitatives menées pour le **cas du stockage des combustibles usés associé à celui des colis de déchets FA-VL (SNR enveloppe + FA-VL)** conduisent aux mêmes conclusions que pour les déchets induits par l'extension du parc (cf. Chapitre 4.3.1.6.1 du présent volume) avec néanmoins des valeurs maximales de doses légèrement supérieures, restant toutefois du même ordre de grandeur.

Comme dans le cas précédent, du fait d'un transfert lent et limité dans les ouvrages et dans le Callovo Oxfordien sur plusieurs centaines de milliers d'années, aucune incidence sanitaire (*i.e.* Dose nulle aux exutoires) n'est à considérer sur les 10 000 premières années suivant la fermeture du stockage.

Pour la situation de référence, les impacts radiologiques sont inférieurs d'environ un ordre de grandeur à la valeur de référence de 0,25 mSv.an^{-1} citée dans le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (19), et principalement pilotés par l'iode 129 des combustibles usés, soit de l'ordre au maximum de 25 µSv.an^{-1} (selon l'influence du terme source des combustibles usés UOX et URE) pour l'exutoire de pompage dans la zone de fracturation diffuse du Dogger en considérant la classe d'âge enfant associée à une biosphère chaude.

Pour la situation enveloppe, les impacts radiologiques sont principalement pilotés par le sélénium 79 des colis HA et l'iode 129 des combustibles usés (principalement UOX) dans une moindre mesure, avec des impacts, pour la classe d'âge adulte (biosphère tempérée) au plus de l'ordre de 0,1 $mSv.an^{-1}$ pour l'exutoire de pompage dans la zone de fracturation diffuse et/ou les failles de l'Oxfordien, de l'ordre de 0,05 $mSv.an^{-1}$ pour l'exutoire de pompage dans la zone de fracturation diffuse du Dogger et de pompage dans le Barrois et de 0,2 $\mu Sv.an^{-1}$ pour l'exutoire rivière de l'Ornain. De même que pour le cas du stockage de l'inventaire de référence, et à titre prospectif, des évaluations de dose ont aussi été menées pour l'inventaire de réserve associé au scénario « SNR enveloppe + FA-VL » en considérant les classes d'âge enfant de 10 ans et enfant de 1 an : la dose obtenue est également inférieure à 0,2 $mSv.an^{-1}$ sauf, comme dans le cas d'étude précédent, pour l'exutoire de pompage dans la zone de fracturation diffuse et/ou les failles de l'Oxfordien qui se distingue par des incidences sanitaires au plus de l'ordre de 0,4 $mSv.an^{-1}$ pour le cas de la biosphère chaude. L'ensemble de ces valeurs sont donc globalement supérieures, d'un facteur 1,5 à 2, à celles du cas de l'architecture « SR1 + FA-VL ». Pour rappel, le traitement quantitatif de la situation enveloppe du SEN associé à l'inventaire de référence montre que le cumul de dose est principalement piloté par le sélénium 79, puis dans une moindre mesure par le chlore 36 et l'iode 129. Dans le cas particulier le plus pénalisant de l'exutoire de pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse et/ou failles de la Marne), la dose maximale du sélénium 79 est supérieure de plus d'un ordre de grandeur à celle du chlore 36 et de l'iode 129. L'inventaire de réserve du scénario « SNR enveloppe + FA-VL » (combustibles usés + HA + MA-VL + FA-VL) fait apparaître un inventaire radiologique en sélénium 79 et en chlore 36 globalement inchangé par rapport à l'inventaire de référence et, pour l'iode 129, un facteur 24 supérieur à l'inventaire de référence. Dans ces conditions, l'impact radiologique du scénario « SNR enveloppe + FA-VL » reste dominé par le sélénium 79, et la multiplication par un facteur 24 de l'inventaire en iode 129 ne modifie que de l'ordre de 50 % (i.e. facteur 1,5) le cumul de dose maximale à l'exutoire de pompage dans l'Oxfordien par rapport à celui de l'inventaire de référence.

Ainsi, les incidences sur la santé des personnes restent inférieures à la valeur de référence du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (21) dans la majorité des exutoires et biosphères étudiés, même en cumulant les conservatismes afin de majorer les transferts des radionucléides. Elles sont plus élevées, tout en restant de l'ordre de grandeur de cette valeur pour un des exutoires « pompage dans l'Oxfordien » (pour une classe d'âge dans le cas d'une biosphère chaude). L'augmentation de l'impact lié au stockage des colis de l'inventaire de réserve reste cependant limitée par rapport au degré de conservatisme de la démarche, qui conduit à un impact en situation de référence inférieur d'environ un ordre de grandeur à celui de la situation enveloppe.

Synthèse des principaux résultats des évaluations à long terme pour le cas d'architecture illustrative « SNR enveloppe + FA-VL »

Par rapport à l'inventaire de référence, l'inventaire de réserve lié à l'arrêt du retraitement des combustibles usés conduit à l'ajout de près de 65 000 combustibles usés et concomitamment à moins de colis de déchets HA et MA-VL (environ 45 000 de moins) dans le stockage, ainsi que l'ajout de colis de déchets FA-VL. Il en résulte une augmentation de l'inventaire des trois principaux radionucléides mobiles à vie longue qui font les incidences sanitaires :

- d'un facteur 24 pour l'iode 129 ;
- d'environ 4 % pour le sélénium 79.

L'inventaire radiologique en chlore 36 diminue très légèrement.

Il n'y a pas de modification du comportement des radionucléides quant à leur transfert dans le système de stockage vers la biosphère. Les incidences sanitaires sur l'homme liées aux radionucléides mobiles à vie longue aux exutoires sont donc dépendantes des inventaires de ces radionucléides dans les colis.

En un million d'années, les parts des inventaires initiaux des trois radionucléides mobiles à vie longue ayant atteint les limites (toit et mur) de la couche du Callovo-Oxfordien et les différents exutoires sont quasiment inchangées par rapport à celles pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence. Les dates d'occurrence des maximums de débits molaires à chaque étape du transfert sont également du même ordre de grandeur.

L'incidence sanitaire correspondant à la performance attendue du stockage en l'état des connaissances disponibles est de l'ordre de la dizaine de microsieverts/an.

Les évaluations menées pour le scénario d'évolution normale enveloppe, et qui constituent ainsi une estimation enveloppe des incidences, conduisent à une dose annuelle totale maximale, dans la très grande majorité des cas, inférieure à la valeur de référence de 0,25 $mSv.an^{-1}$ fixée par le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (19), et d'une valeur proche de la valeur de référence pour la classe d'âge enfants (un an et 10 ans) dans le cas le plus enveloppe, c'est-à-dire dans le cas d'une biosphère chaude, à l'exutoire « pompage dans l'Oxfordien (zone de fracturation diffuse et/ou failles de la Marne) ».

- **En situation de référence**

  Les impacts radiologiques sont globalement pilotés par l'iode 129 du fait de l'augmentation de son inventaire radiologique par rapport à celui de l'inventaire de référence (facteur 24). Une partie de cet inventaire (environ 20 %) est contrôlé par un relâchement lent par les colis URE et certains UOX (contrôle par la solubilité de l'uranium), le reste est associé à un relâchement quasi labile. Les impacts radiologiques associés restent néanmoins au maximum de l'ordre de la dizaine de microsieverts par an pour la classe d'âge enfant, la biosphère chaude et l'exutoire Dogger.

- **En situation enveloppe**

  Les impacts radiologiques sont globalement pilotés par le sélénium 79 des colis de déchets HA, comme pour l'inventaire de référence, et, dans une moindre mesure par l'iode 129 des colis de combustibles usés, malgré un inventaire plus important par rapport à celui de l'inventaire de référence.

  L'impact le plus important reste également celui à l'exutoire pompage dans la zone de fracturation diffuse et/ou les failles de la Marne dans l'Oxfordien sur la base d'hypothèses conservatives, avec des niveaux de doses de l'ordre de 0,2 $mSv.an^{-1}$ à 0,4 $mSv.an^{-1}$ selon la classe d'âge et la biosphère considérées. Ces niveaux de dose constituent, du fait de la représentation conservative de la situation enveloppe, une borne supérieure de l'impact cumulé des incertitudes résiduelles de connaissance en évolution normale. La représentation de la situation enveloppe intègre en effet une combinatoire d'hypothèses conservatives maximisant le relâchement et le transfert des radionucléides : relâchement type labile, paramètres de transfert et de rétention maximisant le transfert des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien et dans les formations encaissantes, etc.

L'augmentation de l'impact radiologique lié au stockage de l'inventaire de réserve reste limitée par rapport au degré de conservatisme de la démarche, qui conduit à un impact en situation de référence inférieur d'environ un ordre de grandeur à celui de la situation enveloppe.

4.3.2 Pour la phase de fonctionnement

4.3.2.1 La démarche de sûreté d'exploitation retenue

La démarche de sûreté mise en œuvre par l'Andra pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence est reconduite. Elle s'appuie sur le principe de défense en profondeur et vise à satisfaire les objectifs de protection en exploitation vis-à-vis de risques radiologiques et non radiologiques présentés dans le volume 2 du présent rapport.

Cette démarche est appliquée selon les enjeux identifiés au chapitre 4.2 du présent volume qui, pour la phase de fonctionnement, sont liés :

- aux caractéristiques spécifiques des combustibles usés et par conséquent, à la conception du bâtiment EP2 mutualisé ;
- aux caractéristiques spécifiques des colis de déchets FA-VL et par conséquent, à la modification, si nécessaire, du bâtiment EP1 pour prendre en charge les colis de déchets FA-VL.

Les caractéristiques des colis de déchets HA et MA-VL de l'inventaire de réserve étant strictement identiques à celles de ces mêmes colis de l'inventaire de référence, l'analyse de sûreté en exploitation menée pour ces derniers (cf. Volume 9 du présent rapport) couvre les colis HA et MA-VL de l'inventaire de réserve.

Afin de répondre à l'objectif de l'adaptabilité, la démarche de sûreté en exploitation est déclinée pour les combustibles usés et les colis de déchets FA-VL selon les étapes suivantes :

- analyse des caractéristiques de ces colis afin de déterminer si elles conduisent à un niveau de risque supérieur ou à de nouveaux risques par rapport à ceux induits par les déchets de l'inventaire de référence. Cette analyse s'appuie notamment sur la comparaison des grandeurs caractéristiques support au dimensionnement de l'installation (cf. Chapitre 2.2.4 du présent volume) ;
- si les caractéristiques de ces colis ne sont pas couvertes par celles des colis de déchets de l'inventaire de référence, une analyse de sûreté dédiée est réalisée selon les trois étapes suivantes (cf. Chapitre 1 du volume 9 du présent rapport) :
  - ✓ l'analyse des risques ;
  - ✓ l'analyse par situations de fonctionnement ;
  - ✓ l'évaluation des impacts radiologiques et non radiologiques des différentes situations de fonctionnement, afin de vérifier, en particulier, le respect des objectifs de protection.

L'ensemble de la démonstration préliminaire de sûreté en exploitation du stockage des colis de l'inventaire de réserve réalisée selon cette démarche est détaillé dans le document cité en référence « Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve » (16). Les principales conclusions eu égard aux spécificités liées au stockage des combustibles usés et à celui des colis de déchets FA-VL sont présentées ci-après.

4.3.2.2 L'effet de la mise en stockage des colis de combustibles usés sur la sûreté en exploitation de l'INB

La mise en stockage des combustibles usés, si elle est décidée, n'étant pas envisagée avant 2080 (cf. Chapitre 3.4.1 du présent volume), la construction initiale (tranche T1) n'est concernée par l'éventualité du stockage de ces colis que vis-à-vis de la descenderie et de ses interfaces avec la surface (*i.e.* Tête de descenderie) et avec le souterrain (*i.e.* ZSL exploitation, ZSL travaux et galeries de liaison). Les autres bâtiments et ouvrages des installations de surface et de l'installation souterraine, construits lors des tranches ultérieures, prendront en compte, en temps voulu, les adaptations à intégrer dans leur conception pour permettre la prise en charge des combustibles usés dans l'INB. Des études préliminaires de sûreté considérant ces adaptations permettent de s'assurer de la maîtrise de la sûreté en phase de fonctionnement.

4.3.2.2.1 Les principales conclusions de l'analyse des risques

L'analyse des risques au stade d'esquisse, dont le détail est présenté dans le document cité en référence « Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve » (16), montre que :

- exposition interne et externe : les objectifs de dose sont respectés sous réserve :
  - ✓ d'un dimensionnement des protections radiologiques adapté à la prise en charge des colis de combustibles usés (*i.e.* Hotte de transfert, voiles en béton du bâtiment EP2 mutualisé et bouchons de radioprotection) compatible avec les contraintes de dose définies au niveau de ces équipements ou installations ;
  - ✓ d'un process de mise en stockage similaire à celui permettant la mise en stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence ;
- dissémination des substances radioactives : les risques de dissémination de substances radioactives sont maitrisés du fait de la robustesse des colis de stockage des combustibles usés à l'égard des différentes agressions susceptibles de se produire sur l'installation et de la définition de systèmes de confinement (barrière(s) de confinement statiques et dynamique) pour les colis combustibles usés dans l'ensemble de l'INB Cigéo ;
- criticité : les critères d'admissibilité sont respectés sous réserve de l'application d'exigences ou dispositions spécifiques déjà identifiées dans le cas de la mise en stockage des colis de déchets HA (par exemple vis-à-vis de la préservation de la géométrie des colis) et pour certaines typologies de colis complétées par le respect d'un pas minimal entre les colis dans l'entreposage du bâtiment de surface dédié aux colis de combustibles usés ;
- thermique : des calculs préliminaires réalisées sur un colis de combustible « fictif », dont toutes les caractéristiques sont enveloppes, permettent d'assurer la faisabilité du respect des différents critères thermiques (sur les gaines, les hottes, les bétons ou les argilites du Callovo-Oxfordien) ;
- gaz de radiolyse et de corrosion : les dispositions de maitrise des risques s'appuient sur des principes similaires à ceux qui seront déployés dans les alvéoles du quartier de stockage HA dont la mise en service n'est envisagée qu'à l'horizon 2080, donc sans préjuger des développements futurs à l'exploitation du quartier pilote HA ;
- opérations de manutention : la maîtrise des risques liées aux opérations de manutention est assurée, pour les installations de surface, par la définition et la prise en compte de spécifications de conception des équipements de manutention (fiabilisation des moyens de manutention, dispositifs amortisseurs ...) compatibles avec la hauteur de qualification à la chute de chacune des typologies de colis de combustibles usés ;
- incendie : la maîtrise des risques liés à l'incendie est assurée en conservant les mêmes dispositions que ceux identifiés pour la mise en stockage des colis de déchets HA de l'inventaire de référence ;
- pyrophoricité : ce risque est spécifique à certains combustibles usés, des dispositions en lien notamment avec les risques de dégagement thermique et les risques liées aux opérations de manutention sont à prendre en compte en temps voulu afin de maitriser les conditions de températures et éviter les chocs lors du transfert des colis ;

- séisme : la maîtrise des risques liés au séisme est assurée dans l'installation souterraine vis-à-vis du stockage des colis de combustibles usés. Pour les installations de surface, la maîtrise des risques est assurée sous réserve du dimensionnement de certains équipements en fonction des modifications apportées ultérieurement à la conception du bâtiment EP2 mutualisé.

Enfin, en ce qui concerne les autres agressions d'origine interne (risques liés aux opérations de construction, à la coactivité travaux/exploitation) et externe, le dimensionnement et les dispositions de maitrise des risques retenus pour la gestion du stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence sont transposables au stockage des colis de combustibles usés.

4.3.2.2.2 Les dispositions complémentaires ou dimensionnements pris en compte dès la construction initiale

Le gabarit de hotte de transfert (cf. Chapitre 3.4.2 du présent volume) est dépendant des épaisseurs minimales de protection radiologiques des hottes de transfert (partie latérale, tête et fond) calculées, pour la catégorie de colis considérée, sur la base de plusieurs paramètres radiologiques et géométriques des colis de stockage.

Compte tenu des caractéristiques radiologiques et géométriques des colis de combustibles usés significativement différentes de celles des colis de déchets HA, et notamment du fait d'émissions neutroniques et de débits de dose plus importants que ceux des colis de déchets HA, la hotte de transfert est dimensionnée pour les colis de stockage des combustibles usés, sur la base :

- de l'identification des familles de colis les plus pénalisantes vis-à-vis du risque d'exposition aux rayonnements ionisants (cf. Grandeurs caractéristiques des colis de combustibles usés au chapitre 2.2.4.1 du présent volume) ;
- du respect du critère DED de 25 $\mu Sv.h^{-1}$ à un mètre.

4.3.2.2.3 Les exigences de conception à prendre en compte lors des tranches ultérieures de construction

Lors des tranches ultérieures de construction de l'INB Cigéo, les caractéristiques spécifiques des combustibles usés devront être prises en compte, de la conception du bâtiment EP2 mutualisé[40] jusqu'aux alvéoles recevant ces combustibles usés.

Sur la base des grandeurs caractéristiques présentées au chapitre 2.2.4.1 du présent volume et de l'analyse de risque dont les conclusions sont présentées au chapitre 4.3.2.2.1 du présent volume, cette prise en compte concerne essentiellement les installations de surface de l'INB et se traduit notamment par :

- le dimensionnement spécifique des voiles en béton du bâtiment EP2 mutualisé et celui des bouchons de radioprotection des alvéoles de combustibles usés, en s'appuyant sur l'identification des familles de colis les plus pénalisantes vis-à-vis du risque d'exposition aux rayonnements ionisants ;
- la définition de systèmes de confinement composés de barrière(s) de confinement statique et/ou barrière de confinement dynamique, dont les caractéristiques (classes de confinement et famille de ventilation associée) sont définies en adéquation avec les caractéristiques des colis de combustibles usés ;
- le dimensionnement de la ventilation du bâtiment EP2 mutualisé ainsi que l'ajout éventuel de capacités de refroidissement ou de protections thermiques vis-à-vis du risque thermique ;
- le respect d'un pas d'entreposage au sein des zones d'entreposage du bâtiment EP2 mutualisé pour les colis primaires et les colis de stockage vis-à-vis du risque de criticité ;
- le cas échéant, le dimensionnement des équipements de manutention et du génie civil pour tenir compte des masses et des géométries de combustibles vis-à-vis des risques liés au séisme.

[40] Il permet la réception des emballages de transport, le déchargement des combustibles usés, leur mise en colis de stockage puis en hotte de transfert.

L'analyse des autres risques, au regard des caractéristiques spécifiques des combustibles usés, a été réalisée vis-à-vis des objectifs de protection cités précédemment (cf. Chapitre 4.3.2.2.1 du présent volume). Elle ne conduit pas à identifier de nouvelles dispositions de maîtrise des risques (dispositions complémentaires ou nouveaux dimensionnements) par rapport à ce qui a été identifié pour la conception des installations permettant la réception et la mise en stockage des colis de déchets HA de l'inventaire de référence.

4.3.2.2.4 Les impacts radiologiques sur l'Homme

La démarche d'évaluation de l'impact radiologique retenue pour les colis de combustibles usés, présentée plus spécifiquement dans le document en référence « Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve » (16), s'appuie sur celle appliquée pour les colis de déchets de l'inventaire de référence (cf. Chapitre 8 du volume 9 du présent rapport). En fonctionnements normal et dégradé ainsi que pour les situations incidentelles et accidentelles identifiées, les doses efficaces sont calculées à partir de la définition des biosphères types, des exutoires ainsi que celle des groupes de référence[41] retenue pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence (14).

L'impact radiologique **en fonctionnement normal et dégradé** (léchage de la contamination par la ventilation dans les installations en surface) pour les colis de combustibles usés est du même ordre de grandeur que pour les colis de déchet HA et MA-VL de l'inventaire de référence, comme explicité en détail dans le document en référence « Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve » (16).

L'impact radiologique global est inférieure à 2×10^{-4} mSv/an en fonctionnement normal et dégradé pour les colis de combustibles usés. Cette exposition est inférieure de plusieurs ordres de grandeur à la limite réglementaire imposée par le code de la santé publique (1 mSv/an) et bien inférieure à la limite haute de l'objectif de dose pour le public que s'est fixée l'Andra (0,25 mSv/an). Elle est également inférieure à l'impact radiologique obtenu pour les colis de déchets HA et MA-VL de l'inventaire de référence.

L'impact radiologique en **situations incidentelles et accidentelles** pour les colis de combustibles usés est au maximum de l'ordre de quelques µSv à long terme (durée de vie entière). Cette exposition est inférieure aux objectifs de protection fixés par l'Andra dans le volume 2 du présent rapport.

Synthèse sur les effets de la mise en stockage des colis de combustibles usés sur la sûreté en exploitation de l'INB

Dans le cas du stockage des colis de combustibles usés dans l'INB Cigéo, aucune disposition complémentaire n'est nécessaire en tranche T1 pour satisfaire les fonctions de protection de l'INB. Les dimensionnements spécifiques à prendre en compte, concernant essentiellement les installations de surface de l'INB, sont les suivants :

- dès la construction initiale (T1), adaptation de la tête de descenderie au dimensionnement du gabarit de hotte de transfert des colis de combustibles usés ;
- lors des tranches ultérieures de construction (TU), conception du bâtiment EP2 mutualisé en lien avec les risques apportés par les caractéristiques spécifiques des colis de combustibles usés (cf. Chapitre 4.2.1 du présent volume).

Par ailleurs, les impacts radiologiques sur l'Homme en fonctionnement normal et dégradé ainsi qu'en situations incidentelles et accidentelles du stockage des colis de combustibles usés restent très inférieurs aux objectifs de protection fixés par l'Andra.

[41] Pour le fonctionnement normal, un groupe de référence multi-activités défini avec des habitudes de vie moyennes et pour trois classes d'âge (nourrisson, enfant, adulte) et plusieurs groupes particuliers représentatifs (villageois, éleveur...) sont étudiés. Pour les situations accidentelles, seul le groupe de référence multi-activités et pour trois classes d'âge est étudié (pour le calcul « à la clôture », seul l'adulte est étudié).

4.3.2.3 L'effet de la mise en stockage des colis de déchets FA-VL sur la sûreté en exploitation de l'INB

La mise en stockage des colis de déchets FA-VL, si elle est décidée, n'est pas envisagée pour la phase de construction initiale (tranche T1) (cf. Chapitre 3.5.1 du présent volume). En revanche, pour préserver la possibilité de leur accueil dans l'INB, le bâtiment EP1 et certaines carrures de la boucle du quartier de stockage MA-VL, parties de l'installation relevant de la tranche 1, sont légèrement adaptés.

4.3.2.3.1 Les principales conclusions de l'analyse des risques

Pour chaque risque, les principales conclusions de l'analyse des risques développées dans le document qui présente les « Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve » (16) sont les suivantes :

- exposition interne et externe : les débits d'équivalent de dose associé aux colis de déchet FA-VL sont inférieurs d'au moins un ordre de grandeur à ceux des colis de déchets MA-VL de l'inventaire de référence ;
- dissémination des substances radioactives : les dispositions prises pour gérer les colis de déchets MA-VL sont suffisantes pour la réception et la mise en stockage des colis de déchets FA-VL. La maitrise du risque de dissémination repose sur l'ajustement de la capacité de ventilation de l'installation souterraine à l'augmentation du nombre d'alvéoles de stockage permettant de recevoir les colis de déchets FA-VL ;
- criticité : les caractéristiques des colis de déchets FA-VL permettent de conclure à une maîtrise des risques dans l'ensemble des installations de l'INB et à toute étape du process ;
- thermique : les caractéristiques des colis de déchets FA-VL permettent de conclure une maîtrise des risques dans l'ensemble des installations de l'INB et à toute étape du process ;
- gaz de radiolyse et de corrosion : les dispositions de maitrise des risques appliquées pour les alvéoles de stockage MA-VL sont directement applicables et transposables aux alvéoles de stockage de colis de déchets FA-VL ;
- agressions internes et externes (opérations de manutention, FSOH, etc.) : les dispositions de maitrise des risques appliquées dans l'ensemble des installations de l'INB et à toute étape du process sont directement applicables et transposables aux alvéoles de stockage de colis ce déchets FA-VL ;
- Incendie : En ce qui concerne la présence de graphite dans les chemises et empilements vis-à-vis du risque incendie, que ce soit pour les CBFK-B ou les CS4-graphite, colis spécifiques aux déchets FA-VL, les déchets sont noyés dans une matrice cimentaire (cf. Chapitre 2.2.1.3 du présent volume) et le conteneur présente une épaisseur suffisante, ce qui permet d'éviter tout risque d'échauffement excessif du colis sous incendie ;
- opérations de construction et coactivité travaux/exploitation : l'ajout d'un quartier de stockage FA-VL à l'est du quartier de stockage MA-VL n'engendre pas de risque supplémentaire. Les principes actuels de gestion de la coactivité sont conservés pour faire face à l'augmentation des flux de construction, effectifs et flux de travaux.

4.3.2.3.2 Les dispositions complémentaires et dimensionnements spécifiques pris en compte dès la construction initiale

Les modifications du bâtiment nucléaire de surface EP1 et de certaines carrures de la boucle du quartier de stockage MA-VL, liées à la géométrie des colis pour la première et à l'ajout d'un quartier de stockage FA-VL à l'est du quartier de stockage MA-VL pour la seconde, n'entrainent pas de conséquence sur la démonstration de sûreté en exploitation réalisée pour les colis de l'inventaire de référence. Ainsi, aucune autre disposition complémentaire ou dimensionnement spécifique lié à la sûreté en exploitation de l'INB n'est identifié pour la tranche T1.

4.3.2.3.3 Les exigences de conception à prendre en compte lors des tranches ultérieures de construction

Lors des tranches ultérieures de construction de l'INB, les caractéristiques spécifiques des colis de déchets FA-VL devront être prises en compte, pour la conception du bâtiment ET-H[42] jusqu'aux alvéoles recevant ces colis de déchets FA-VL. Cela concerne principalement le dimensionnement de la capacité totale de ventilation des quartiers de stockage MA-VL et FA-VL.

L'analyse des autres risques, au travers de l'analyse des grandeurs caractéristiques des colis de déchets FA-VL présentées au chapitre 2.2.4.2 du présent volume, ne conduit pas à identifier de nouvelles dispositions de maîtrise des risques (dispositions complémentaires ou nouveaux dimensionnements) par rapport à ce qui a été identifié pour la conception des installations permettant la réception et la mise en stockage des colis de déchets MA-VL de l'inventaire de référence.

4.3.2.3.4 Les impacts radiologiques des scénarios sur l'Homme

Les impacts radiologiques des colis de déchets FA-VL, en fonctionnement normal et en situations accidentelles, sont couverts par les impacts radiologiques des colis de déchets MA-VL de l'inventaire de référence. En effet, les impacts radiologiques à la population des scénarios accidentels associés aux colis de déchets MA-VL sont enveloppes de ceux définis pour les colis de déchets FA-VL (cf. Chapitre 2.2.4.2 du présent volume).

Synthèse sur les effets de la mise en stockage des colis de déchets FA-VL sur la sûreté en exploitation de l'INB

Dans le cas du stockage des colis de déchets FA-VL dans l'INB Cigéo, les fonctions de protection de l'INB sont satisfaites pour les installations adaptées à la prise en charge de ces colis construites en tranche T1.

Lors des tranches ultérieures de construction de l'INB, l'ajustement des capacités de ventilation de l'installation souterraine est à prendre en compte au regard de l'augmentation du nombre d'alvéoles de stockage au niveau de la zone de stockage MA-VL pour la maitrise du risque de dissémination des substances radioactives. Par ailleurs, les dispositions de maitrise des risques et les impacts radiologiques sur l'Homme en cas de stockage des colis de déchets FA-VL sont couverts par ceux relatifs au stockage des colis de déchets MA-VL.

[42] Attenant au bâtiment EP1, il permet le déchargement des emballages de transport à déchargement horizontal.

5

Conclusion sur l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve

En réponse à l'avis de l'ASN n° 2018-AV-0300 du 11 janvier 2018 (2) qui stipule qu' *« Au stade de la demande d'autorisation de création de l'installation, l'Andra doit présenter l'inventaire de réserve retenu, conformément à l'avis de l'ASN du 31 mai 2016 susvisé, et justifier qu'il n'y a pas d'élément rédhibitoire au stockage des déchets de cet inventaire de réserve. »*, ce volume décrit l'ensemble des colis présents dans l'inventaire de réserve (cf. Chapitre 2 du présent volume) et apporte les principales conclusions des études de conception et de sûreté qui permettent de justifier de la faisabilité du stockage des colis de l'inventaire de réserve (cf. Chapitres 3 et 4 du présent volume).

Ces études d'adaptabilité répondent également aux objectifs indiqués dans l'annexe C à la lettre ASN du 12 janvier 2018 (3) et présentés au chapitre 1.3 du présent volume.

Les grands principes directeurs de la conception[43] et les principes généraux de la conception[44], appliqués à l'INB Cigéo telle que prévue pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence, sont également appliqués aux études de conception au titre de l'adaptabilité. Cela concerne notamment les alvéoles de stockage et les colis de stockage, ainsi que les exigences associées, par exemple en matière de dimensionnement thermique. De facto, cela contribue à ce que l'*« esquisse des concepts retenus pour l'éventuel stockage des déchets de cet inventaire »* soit compatible avec la configuration prévue pour le stockage des colis de déchets de l'inventaire de référence.

Par ailleurs, des dispositions conservatoires sont retenues dès la construction initiale de l'INB, par exemple les dimensions de la descenderie de descente des colis de stockage et des galeries d'accès (cf. Chapitre 3), afin de garantir in fine l'adaptabilité. Ainsi, les études d'adaptabilité montrent que la conception retenue de l'INB « *préserve la possibilité technique de l'accueil des déchets de cet inventaire* [de réserve] ».

En cas de décision de stocker tout ou partie des colis de l'inventaire de réserve, les « *modifications éventuelles à apporter aux installations « support » (descenderies, galeries d'accès, installations de surface, ventilation...)* » sont identifiées et prises en compte dans la conception de l'INB (cf. Volume 5 du présent rapport). Dès la construction initiale, il s'agit notamment des dispositions suivantes :

- la conception du bâtiment de surface EP1 intègre la possibilité de prendre en charge des colis de déchets FA-VL de l'inventaire de réserve vis-à-vis de leurs caractéristiques spécifiques et de leur nombre plus important ;
- la tête de descenderie des colis intègre dans sa conception les dimensions du gabarit de la hotte de transfert des colis de combustibles usés, plus importantes que celles de la hotte de transfert des colis de déchets HA ;
- la boucle du quartier de stockage MA-VL intègre dans sa conception la présence de deux carrures en croix en prévision de l'ajout d'alvéoles de stockage supplémentaires à la suite (à l'est).

D'autres adaptations à apporter à la conception pour permettre la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve seront prises en compte au moment voulu en lien avec la progressivité du déploiement de l'INB, lors des tranches ultérieures de construction des installations de l'INB. Certaines adaptations identifiées dès à présent et présentées au chapitre 3 du présent volume sur la base de la conception telle que prévue (cf. Volume 5 du présent rapport), ne préemptent des choix futurs pris au moment voulu, et complètent la démonstration de la faisabilité technique *« de l'accueil des déchets de cet inventaire* [de réserve] ».

L'étude de l'*« impact potentiel sur la démonstration de sûreté de l'installation »* de la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve dans l'INB, dont les conclusions sont présentées au chapitre 4 du présent volume, montre que le choix de conserver les grands principes directeurs de la conception pour l'inventaire de référence, les adaptations conservatoires de la conception et la spécificité des colis stockés (nombre et caractéristiques) ne remettent pas en cause la sûreté de l'INB.

---

[43] *i.e.* Quartiers de stockage séparés et globalement borgnes, regroupement de la base des LSF, alvéoles de grande longueur, positionnement des quartiers de stockage par rapport aux LSF (amont ou aval hydraulique) et caractéristiques hydrauliques des ouvrages souterrains, notamment des scellements (cf. Volume 7 du présent rapport).

[44] *i.e. « principes retenus spécifiquement à chaque fonction de sûreté après fermeture »* (cf. Volume 2 du présent rapport).

En phase long terme après-fermeture, en raison, d'une part du choix des mêmes grands principes directeurs de la conception que pour l'inventaire de référence et des caractéristiques du Callovo-Oxfordien de ce fait inchangées afin d'assurer une bonne maitrise des processus qui pilotent le fonctionnement phénoménologique du système de stockage, et d'autre part du respect des exigences qui permettent de satisfaire les fonctions de sûreté, les études montrent que la performance du système de stockage n'est pas affectée par le stockage des colis de l'inventaire de réserve. Les incidences sanitaires sur l'homme sont acceptables et atteignent leur maximum à des horizons de temps très lointains (au-delà de 500 000 ans) comme pour l'inventaire de référence. Ces incidences augmentent en relation avec l'augmentation de l'inventaire stocké, celui des radionucléides mobiles à vie longue et en particulier l'iode 129 mais elles restent de l'ordre de la dizaine de microsieverts pour la situation de référence du scénario d'évolution normale. Même pour la situation enveloppe du scénario d'évolution normale qui constitue une représentation enveloppe du fonctionnement du système de stockage après fermeture et à long terme, ces incidences correspondent à des niveaux globalement inférieurs à la valeur de référence de 0,25 mSv/an, ou, pour l'exutoire pénalisant qu'est celui d'un pompage dans la zone de fracturation diffuse dans l'Oxfordien (cf. Volume 8 du présent rapport), restent du même ordre que cette valeur.

En phase de fonctionnement, les études montrent que les caractéristiques spécifiques des colis de l'inventaire de réserve ne remettent pas en cause les fonctions de sûreté. Les principales dispositions de maitrise des risques, déterminées pour le stockage des colis de l'inventaire de référence, sont applicables et transposables pour toutes les tranches de construction.

Vis à vis de la R&D, afin de permettre « *de disposer, en temps voulu, de la démonstration complète de la sûreté de leur stockage* » *répondant, notamment aux besoins de l'adaptabilité*, l'Andra a identifié et jalonné différents axes de développement (20) en lien avec la progressivité de la construction dont le principal objectif est de donner de la visibilité sur les compléments de démonstration de sûreté et de conception au-delà de la phase d'esquisse qui seraient nécessaires pour confirmer la démonstration de sûreté en exploitation et après fermeture. En effet, les axes de R&D identifiés pour l'inventaire de référence couvrent en quasi-totalité les besoins pour l'adaptabilité dans une logique de consolidation ou d'optimisation (par exemple, la prise en compte d'une approche de comportement thermo-hydromécanique du Callovo-Oxfordien moins pénalisante pour le dimensionnement thermique de l'architecture du quartier de stockage de combustibles usés par rapport à l'approche enveloppe prudente retenue à ce stade de la conception). La R&D spécifique pour les sujets de sûreté spécifiques à l'adaptabilité porte sur les combustibles usés :

- la caractérisation de leur comportement en situation de stockage (termes sources) » ;
- la consolidation de la démonstration de l'absence de risque de criticité après-fermeture, en particulier pour les combustibles civils et militaires du CEA qui ont des caractéristiques très diverses en termes de nature physico-chimique/caractéristiques géométriques pour un nombre de combustibles limité comparativement aux combustibles UOx/MOx.

Ces études et recherches spécifiques à l'adaptabilité s'inscrivent, dans le « *Plan de développement de l'installation de stockage Cigéo* » (20) , à l'instar des autres études qui y sont présentes et relèvent de démarche d'itérations s'appuyant sur les trois piliers que sont la sûreté, la conception et les connaissances (scientifiques et technologiques).

En outre, les actions de reconnaissance déjà prévues dans le cadre du déploiement de l'INB Cigéo, pour l'inventaire de référence, notamment avec la réalisation de forages profonds, permettront de confirmer et d'affiner, la connaissance des propriétés de la couche du Callovo-Oxfordien sur toute la ZIOS, en particulier dans la partie prévue pour le déploiement éventuel des quartiers de stockage des combustibles usés, et à ses abords immédiats. Ces connaissances permettront le cas échéant de définir de manière précise l'architecture souterraine associée à l'inventaire de réserve.

ANNEXES

Annexe 1 Tableau des catégories physico-chimiques des familles de colis FA VL

Identifiant Famille élémentaire	Intitulé Famille élémentaire	Catégorie
CEA-3060	Chemises en graphite utilisés lors de l'exploitation des réacteurs Chinon A2 et A3	Graphite
CEA-3070	Tronçons en graphite et fils de selle issus du déchemisage des éléments combustibles utilisés lors de l'exploitation des réacteurs Chinon A2 et A3	Graphite
EDF-3070	Déchets des silos de Saint-Laurent	MA-VL3.2
CEA-3010	Briques en graphite constitutives de l'empilement du réacteur G1	Graphite
CEA-3021	Briques en graphite (empilement) constitutives du modérateur du réacteur G2	Graphite
CEA-3022	Briques en graphite (empilement) constitutives des réflecteurs du réacteur G2	Graphite
CEA-3031	Briques en graphite (empilement) constitutives du modérateur du réacteur G3	Graphite
CEA-3032	Briques en graphite (empilement) constitutives des réflecteurs du réacteur G3	Graphite
CEA-3040	Briques en graphites constitutives des réflecteurs de la pile EL2	Graphite
CEA-3050	Briques en graphites constitutives des réflecteurs de la pile EL3	Graphite
CEA-3080	Briques en graphites constitutives des bouchons du réacteur Rapsodie	Graphite
EDF-3011	Briques en graphite constitutives de l'empilement du réacteur Bugey 1	Graphite
EDF-3012	Rondins en graphite constitutifs de la protection biologique du réacteur Bugey 1	Graphite
EDF-3021	Briques en graphite constitutives de l'empilement du réacteur Saint-Laurent A1	Graphite
EDF-3022	Rondins en graphite constitutifs de la protection biologique du réacteur Saint Laurent A1	Graphite
EDF-3031	Briques en graphite constitutives de l'empilement du réacteur Saint-Laurent A2	Graphite
EDF-3032	Rondins en graphite constitutifs de la protection radiologique du réacteur Saint-Laurent A2	Graphite
EDF-3040	Briques en graphite constitutives de l'empilement du réacteur Chinon A1	Graphite
EDF-3050	Briques en graphite constitutives de l'empilement du réacteur Chinon A2	Graphite
EDF-3060	Briques en graphite constitutives de l'empilement du réacteur Chinon A3	Graphite
COG-3010	Déchets du silo 130 de La Hague	Graphite
COG-3020	Déchets du silo 115 de La Hague	Graphite

Identifiant Famille élémentaire	Intitulé Famille élémentaire	Catégorie
COG-3030	Déchets issus du traitement des eaux et des combustibles UNGG du décanteur 1	MA-VL3.1
COG-3040	Déchets issus du traitement des eaux et des combustibles UNGG du décanteur 2	MA-VL3.1
COG-3050	Déchets issus du traitement des eaux et des combustibles UNGG du décanteur 8	MA-VL3.1
COG-3060	Déchets issus du traitement des eaux et des combustibles UNGG des fosses 217-01 et 217-02	MA-VL3.1
COG-3070	Déchets issus du traitement des eaux et des combustibles UNGG de la fosse 211-06	MA-VL1
CEA-6010	Fûts en acier inoxydable issus du reconditionnement des fûts en acier non allié contenant des enrobés bitumineux produits avant 1995	MA-VL2
AND-7000	Sources de détecteurs ioniques	MA-VL3.2
AND-7010	Paratonnerres compactés à l'INB37	MA-VL4
AND-7020	Déchets de la défense nationale	MA-VL3.2

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 2-1	Comparaison du nombre de colis de déchets HA et MA-VL entre le scénario SR2 et le scénario SR1	14
Figure 2-2	Comparaison du nombre de colis de déchets HA, MA-VL et de colis de combustibles usés entre le scénario SR2 et le scénario SNR enveloppe	15
Figure 2-3	Répartition du nombre de colis primaires selon les typologies de combustibles usés	18
Figure 2-4	Répartition du nombre de colis primaires selon les typologies de déchets FA-VL	21
Figure 2-5	Illustration d'un conteneur de stockage de colis de combustible usé et comparaison avec celui d'un colis de déchet HA	27
Figure 2-6	Répartition du volume de colis de stockage selon les différentes typologies de combustibles usés et de déchets HA- Scénario SNR enveloppe	28
Figure 2-7	Illustration des colis spécifiques aux déchets FA-VL : CBF-C2K, CBFK-B et CS4 graphite	29
Figure 2-8	Répartition du volume de colis de stockage selon les différentes typologies de déchets FA-VL	30
Figure 2-9	Comparaison des activités du carbone 14, du chlore 36, du sélénium 79 et de l'iode 129 pour les colis de déchets HA, MA-VL et FA-VL entre le scénario SR2 et le scénario SR1 + FA-VL	34
Figure 2-10	Comparaison des activités du carbone 14, du chlore 36, du sélénium 79 et de l'iode 129 pour les colis de déchets HA, MA-VL, FA-VL et combustibles usés entre le scénario SR2 et le scénario SNR enveloppe + FA-VL	35
Figure 2-11	Masses des toxiques chimiques déclarées au titre du déchet pour l'ensemble des colis primaires associés au scénario SR1	37
Figure 2-12	Masses des toxiques chimiques déclarées au titre du déchet pour l'ensemble des colis primaires associés au scénario SNR enveloppe	38
Figure 2-13	Masses des toxiques chimiques déclarées au titre du déchet pour les colis primaires de type MA-VL et FA-VL associés au stockage des colis de déchets FA-VL	39
Figure 3-1	Installations de surface de la zone descenderie de l'INB - Tranche T1	52
Figure 3-2	Installations de surface de la zone descenderie de l'INB - Tranche TU	53
Figure 3-3	Installation souterraine de l'INB - Tranche T1	55
Figure 3-4	Installation souterraine de l'INB - Tranches TU	56
Figure 3-5	Solution possible d'emplacement d'un bâtiment permettant la gestion des HA et CU	60
Figure 3-6	Gabarit des hottes de transfert pour les colis de déchets HA et pour les combustibles usés	61
Figure 3-7	Hotte de transfert de combustibles usés sur le funiculaire	62
Figure 3-8	Transfert des colis CU vers la gare haute du funiculaire	63
Figure 3-9	Illustration des quartiers de stockage HA et de CU pour le scénario SNR enveloppe d'évolution de politique énergétique	65
Figure 3-10	Circulation des hottes de transfert de combustibles usés dans les galeries de liaison	66
Figure 3-11	Les adaptations des ouvrages de la zone de stockage MA-VL lors des tranches ultérieures (TU)	70

Tableaux

Tableau 2-1	Typologies de colis de déchets HA et MA-VL associés au scénario SR1 de l'édition 2018 de l'Inventaire national	13
Tableau 2-2	Typologies de colis de déchets HA et MA-VL et de colis de combustibles usés associés au scénario SNR enveloppe, variante du scénario SNR de l'édition 2018 de l'Inventaire national.	15
Tableau 2-3	Typologies de colis de déchets FA-VL associés à la réorientation du mode de gestion des déchets FA-VL	16
Tableau 2-4	Inventaire des colis de stockage de combustibles usés	25
Tableau 2-5	Inventaire des colis de stockage FA-VL	29
Tableau 2-6	Facteurs de marge appliqués aux activités en fonction du niveau de connaissance	31
Tableau 2-7	Répartition à date des facteurs de marge appliqués aux inventaires radiologiques au prorata du nombre de colis primaires pour le cas de l'allongement de la durée de fonctionnement du parc (scénario SR1)	31
Tableau 2-8	Répartition à date des facteurs de marge appliqués aux inventaires radiologiques au prorata du nombre de colis primaires pour le cas de l'arrêt anticipé du retraitement de l'ensemble des combustibles usés concomitant à l'allongement de la durée de fonctionnement du parc (scénario SNR enveloppe)	32
Tableau 2-9	Répartition à date des facteurs de marge appliqués aux inventaires radiologiques au prorata du nombre de colis primaires pour le cas du stockage de colis de déchets FA-VL	33
Tableau 2-10	Masses des toxiques chimiques déclarées au titre du déchet pour le cas de l'allongement de la durée de fonctionnement du parc (scénario SR1)	36
Tableau 2-11	Masses des toxiques chimiques déclarées au titre du déchet pour le cas de l'arrêt anticipé du retraitement de l'ensemble des combustibles usés concomitant à l'allongement de la durée de fonctionnement du parc (scénario SNR enveloppe)	37
Tableau 2-12	Masses des toxiques chimiques déclarées au titre du déchet pour le cas du stockage de colis de déchets FA-VL	39
Tableau 2-13	Évaluation des grandeurs caractéristiques maximales relatives à une mobilisation de la contamination surfacique labile en fonctionnement normal et dégradé pour les combustibles usés d'EDF et du CEA	42
Tableau 2-14	Évaluation des grandeurs caractéristiques maximales relatives à une mobilisation de la contamination surfacique labile en fonctionnement normal et dégradé pour les combustibles usés d'EDF et du CEA	43
Tableau 2-15	Évaluation des grandeurs caractéristiques relatives à une mobilisation du contenu radioactif interne solide du colis primaire en cas de chute excédant sa hauteur de qualification	44
Tableau 2-16	Puissances thermiques moyennes par type de colis de stockage et famille de colis associées	45
Tableau 3-1	Bâtiments et ouvrages prévus en tranche T1 concernés par la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve et points d'attention associés	53
Tableau 3-2	Bâtiments prévus en tranches TU concernés par la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve et points d'attention associés	54
Tableau 3-3	Ouvrages prévus en tranche T1 concernés par la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve et points d'attention associés	56
Tableau 3-4	Ouvrages prévus en tranches TU concernés par la prise en charge des colis de l'inventaire de réserve et points d'attention associés	57

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 Loi n°2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue (2016). Journal officiel de la République française.

2 Avis n°2018-AV-0300 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 11 janvier 2018 relatif au dossier d'options de sûreté présenté par l'Andra pour le projet Cigéo de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2018). N°2018-AV-0300. 7 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/content/download/155337/1525188?version=3.

3 Lettre CODEP-DRC-2018-001635 de l'ASN du 12 janvier 2018 relative au Dossier d'options de sûreté pour le projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2018). N°CODEP-DRC-2018-001635. 45 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/Lettre-adressee-a-l-Andra-precisant-les-options-de-surete-Cigeo.

4 Lettre CODEP-DRC-2016-005220 de l'ASN du 20 juin 2016 relative au dossier "projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde - plan de développement des composants du projet Cigéo". Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2016). N°CODEP-DRC-2016-005220. 7 p.

5 PNGMDR 2016-18 - Proposition de types et de quantités de déchets à inclure dans l'inventaire de réserve de Cigéo. Andra (2019). Document N°DG/DIR/19-0085. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/00-PNGMDR/PNGMDR-2016-2018/Proposition-de-types-et-de-quantites-de-dechets-a-inclure-dans-l-inventaire-de-reserve-de-Cigeo-version-de-juillet-2017-Andra.

6 Avis n°2020-AV-0369 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 1er décembre 2020 sur les études concernant la gestion des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HA et MA-VL), remises en application du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018, en vue de l'élaboration du cinquième plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2020). N°2020-AV-0369. 16 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/content/download/174416/1798843?version=2.

7 Arrêté du 23 février 2017 pris en application du décret n° 2017-231 du 23 février 2017 pris pour application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, en charge des relations internationales sur le climat (2017). Journal officiel de la République française, N°0048.

8 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Inventaire de réserve de l'INB Cigéo. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-ESE-0000-19-0329.

9 Contenu des études relatives à l'adaptabilité de Cigéo au stockage des déchets de l'inventaire de réserve. Andra (2019). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-19-0011. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/00-PNGMDR/Contenu-des-etudes-relatives-a-l-adaptabilite-de-Cigeo-au-stockage-des-dechets-de-l-inventaire-de-reserve?

10 Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018. Autorité de sûreté nucléaire (ASN); Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, en charge des relations internationales sur le climat (2017). 282 p.

11 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Démarche d'élaboration des inventaires de l'INB Cigéo. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-20-0014.

12 Inventaire national des matières et déchets radioactifs - Les essentiels 2018. Ancra (2018). Document N°PUBLI/20-0826. Disponible à l'adresse : https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/andra-les_essentiels-2018.pdf.

13 Décret n°2017-231 du 23 février 2017 pris pour application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, en charge des relations internationales sur le climat (2017). Journal officiel de la République française. Vol. 9, N°48.

14 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Inventaire de référence retenu pour la conception et la démonstration de sûreté de l'INB Cigéo au stade des études d'avant-projet. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-CS0-0000-20-0002.

15 Inventaire national des matières et déchets radioactifs - Les essentiels 2015. Ancra (2015). Document N°DICOD/15-0024. Disponible à l'adresse : https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/2015_-_les_essentiels.pdf.

16 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-21-0016.

17 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 16 - Plan directeur de l'exploitation. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SDR-0000-19-0001.

18 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification des choix d'architecture souterraine. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-AF0-0000-19-0001.

19 Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2008). 32 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/content/download/50883/352509?version=2.

20 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 20 - Plan de développement de l'installation de stockage Cigéo. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-PDD-AMOA-SDR-0000-19-0002.

© Andra • Décembre 2022 • Création graphique : Agence Les Récréateurs • Crédit photo : Andra



ANDRA

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
Tél. : 01 46 11 80 00

www.andra.fr