RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ANDRA

2026

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

PIÈCE 7

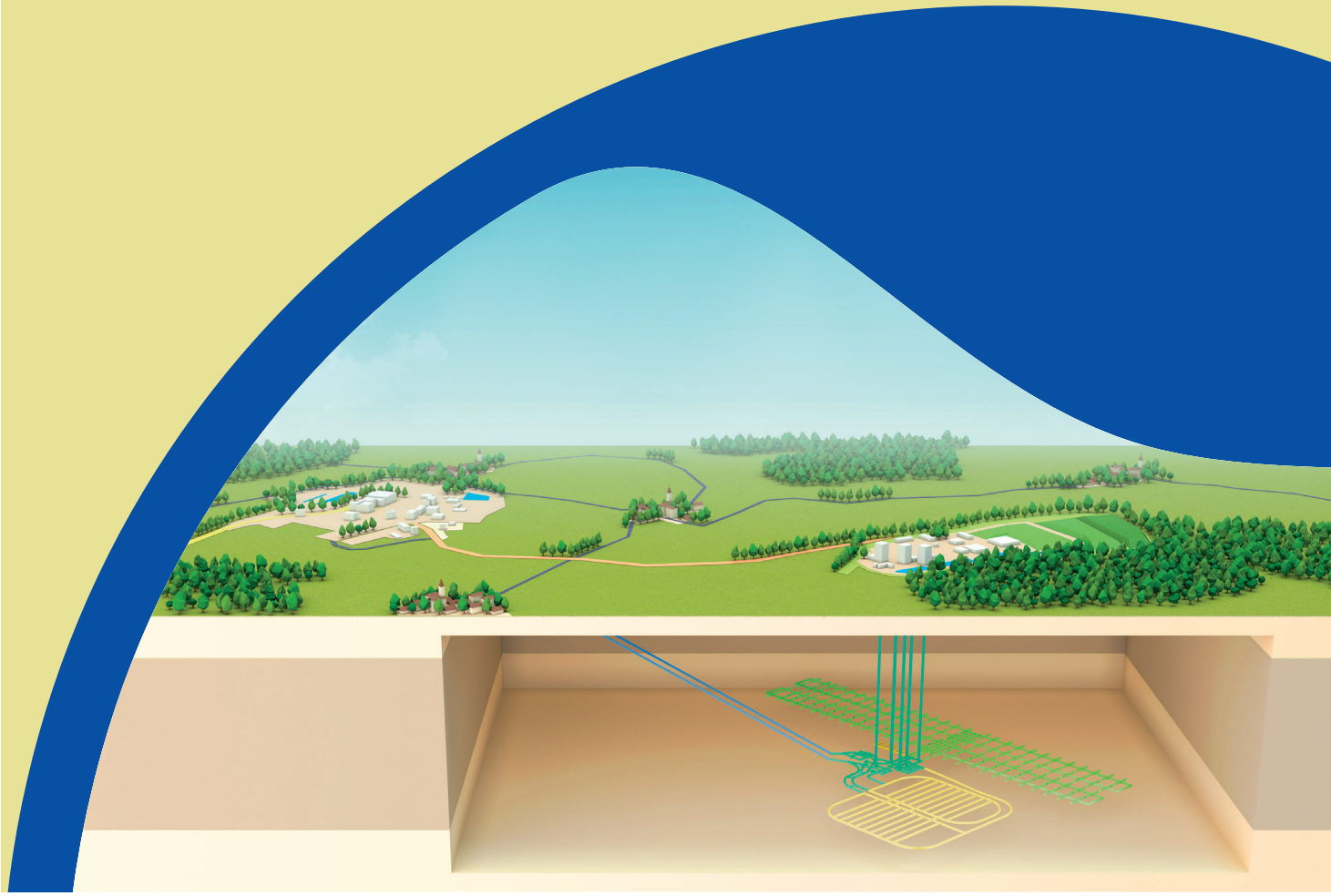
Version préliminaire du rapport de sûreté

PARTIE IV

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

Volume 11

La flexibilité de l'exploitation de l'INB



MISE À JOUR DU DOSSIER D'AUTORISATION DE CRÉATION POUR ENQUÊTE PUBLIQUE

À la suite de l'instruction technique par l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection et des consultations réglementaires, et avant son passage en enquête publique, des mises à jour ont été apportées par l'Andra dans certaines pièces du dossier (déposé initialement le 16 janvier 2023).

Pour la clarté de l'information, l'Andra assure la traçabilité de ces mises à jour via les moyens suivants :

- des barres grises en marge du texte pour tracer les modifications ou ajouts en amont des consultations réglementaires ;
- un surlignage gris pour tracer les modifications ou ajouts depuis les consultations réglementaires ;
- des tableaux de traçabilité de ces mises à jour.

Les corrections mineures (orthographiques, de forme ou d'imprécision) ne sont pas matérialisées.

Sommaire

1. La présentation des évolutions possibles au titre de la flexibilité 7

1.1 Des évolutions du conditionnement de certaines familles de déchets 9
1.2 Des évolutions de livraison des colis 10
1.3 Des changements de modes de stockage des colis 11
1.4 Des évolutions du nombre de colis et d'alvéoles 11
1.5 Des changements de stratégie en matière de fermeture du stockage 12

2. Les dispositions de conception et d'organisation prévues pour assurer la flexibilité pendant l'exploitation de l'INB 13

2.1 La flexibilité face à des évolutions du conditionnement des déchets 14
2.1.1 La flexibilité apportée par des dispositions en matière de process nucléaire 15
2.1.2 La flexibilité apportée par le déploiement progressif des ouvrages en surface et souterrains 16
2.2 La flexibilité face à des évolutions de livraison des colis 18
2.2.1 La flexibilité liée à l'ordonnancement du stockage des colis 18
2.2.2 La flexibilité liée à la cadence de stockage 19
2.3 La flexibilité face à des changements de modes de stockage des colis 20
2.4 La flexibilité face à une évolution du nombre de colis et d'alvéoles 20
2.5 La flexibilité face à des changements de stratégie en matière de fermeture du stockage 22

3. L'analyse de la flexibilité du point de vue de la sûreté 25

3.1 L'analyse de la flexibilité du point de vue de la sûreté après-fermeture 26
3.1.1 La flexibilité face aux évolutions du conditionnement des colis 26
3.1.2 La flexibilité face à des évolutions de livraison des colis 29
3.1.3 La flexibilité face à des changements de modes de stockage des colis 30
3.1.4 La flexibilité face à la variabilité des colis et au nombre d'alvéoles de stockage qui en résulte 31
3.1.5 La flexibilité face à des changements de stratégie en matière de fermeture 31
3.2 L'analyse de la flexibilité du point de vue de la sûreté en exploitation 32
3.2.1 La flexibilité face aux évolutions du conditionnement des colis 32
3.2.2 La flexibilité face à des évolutions de livraison des colis 33
3.2.3 La flexibilité face à des changements de modes de stockage des colis 33
3.2.4 La flexibilité face à une fluctuation du nombre de colis et d'alvéoles 34
3.2.5 La flexibilité face à des changements de stratégie en matière de fermeture du stockage 34

4. Le cas spécifique de la flexibilité vis-à-vis des voies de gestion des déchets bitumés 37

4.1 Le rappel du contexte 38
4.2 La description des deux voies de gestion des déchets bitumés envisagées 41
4.2.1 Le stockage des colis de déchets bitumés en l'état 41
4.2.2 Le stockage des colis issus d'un traitement des fûts de déchets bitumés 41
4.2.3 Synthèse 43

4.3 Les dispositions de conception pour les deux voies de gestion des déchets bitumés envisagées *44*
4.3.1 Le stockage des colis issus du traitement des fûts de déchets bitumés 44
4.3.2 Le stockage des colis de déchets bitumés en l'état 45
4.4 L'analyse de la flexibilité vis-à-vis des deux voies de gestion envisagées vis-à-vis de la sûreté *55*
4.4.1 L'analyse du point de vue de la sûreté après-fermeture 55
4.4.2 L'analyse du point de vue de la sûreté en phase de fonctionnement 56

Annexes 71

Annexe 1 Extrait de la synthèse du rapport final de la revue d'experts de juin 2019 relatif à la gestion des déchets bitumés *72*
Annexe 2 Les différentes voies de traitement des fûts de déchets bitumés selon la note « Evaluation comparée des différents modes de gestion envisagés pour les déchets bitumés » *74*
2.1 La filière 1 « incinération/vitrification » *74*
2.2 La filière 2 « combustion classique et cimentation ou vitrification » *75*
2.3 La filière 3 « vaporeformage » *75*
Annexe 3 Les impacts radiologiques sur le public et en termes de pollution des sols du scénario d'emballement postulé de déchets bitumés *77*
3.1 Les impacts radiologiques *77*
3.2 Les impacts en termes de pollution radiologique et chimique des sols *79*
3.2.1 Les dépôts surfaciques au sol 79
3.2.2 Les impacts sur les produits agroalimentaires 79

Tableau de traçabilité des principales évolutions 81

Tables des illustrations 83

Références bibliographiques 85

Préambule

La conception de l'INB Cigéo intègre le volet flexibilité, qui constitue un des volets de la réversibilité définie par l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement. Vis-à-vis de la flexibilité cet article précise que *« … la réversibilité est mise en œuvre par … 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. ».*

En réponse à l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement, en lien avec des évolutions probables de ces données d'entrées, l'objectif du présent volume est de montrer comment la flexibilité de l'exploitation est prise en compte dans la conception de l'INB Cigéo et la démonstration de sûreté des opérations menées pendant la phase de fonctionnement en tenant compte de son développement progressif.

Compte tenu des incertitudes résiduelles sur le mode de conditionnement des déchets bitumés, la conception de l'INB envisage à ce stade les deux voies de gestion suivantes : le stockage en l'état de colis de déchets bitumés mis en conteneurs renforcés vis-à-vis de l'incendie ou le stockage de colis de déchets MA-VL après traitement des fûts de déchets bitumés. Ces deux voies de gestion sont traitées au titre de la flexibilité.

Ainsi, le présent volume est structuré selon les quatre chapitres suivants :

- le premier chapitre détaille les différents types de flexibilité intégrés dans la conception initiale de l'INB et présente pour chacune de ces flexibilités la stratégie de traitement retenue ;
- le deuxième chapitre présente les dispositions de conception et d'organisation prévue pour assurer la flexibilité pendant l'exploitation de l'INB vis-à-vis de chacun de ces différents types de flexibilité ;
- le troisième chapitre analyse la flexibilité d'un point de vue de la sûreté en exploitation et après-fermeture ;
- enfin, le quatrième chapitre se focalise la flexibilité aux deux voies de gestion des déchets bitumés.

1

La présentation des évolutions possibles au titre de la flexibilité

1.1 Des évolutions du conditionnement de certaines familles de déchets 9
1.2 Des évolutions de livraison des colis 10
1.3 Des changements de modes de stockage des colis 11
1.4 Des évolutions du nombre de colis et d'alvéoles 11
1.5 Des changements de stratégie en matière de fermeture du stockage 12

Afin de répondre à une demande sociétale forte, le Parlement a demandé en 2006 que le stockage en couche géologique profonde soit réversible. Conformément à l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement, le décret d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo fixera la durée pendant laquelle, *« à titre de précaution, la réversibilité du stockage doit être assurée. Cette durée ne peut être inférieure à cent ans »*.

L'article L. 542-10-1 du code de l'environnement précise que *« 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 »*.

En réponse à ces demandes, la flexibilité de l'INB en phase de fonctionnement est analysée sous l'angle de :

- la capacité à accepter certaines variations de l'inventaire de colis de déchets de référence (évolutions « limitées » des inventaires, des types de conditionnement, des modes de stockage ou des livraisons) ;
- la capacité, favorisée par le développement progressif de l'installation souterraine, à pouvoir recevoir des colis de déchets MA-VL dont le type de conditionnement et/ou le mode de stockage aurait évolué (cas des colis MA-VL destinés à un mode de stockage en conteneur de stockage qui passeraient en mode de stockage direct à la condition de respecter les spécifications d'acceptation des colis pour ce mode de stockage) ;
- la possibilité offerte aux générations futures :
  - ✓ d'une part, d'améliorer la conception et la sûreté de l'installation en tenant compte de possibles avancées scientifiques et technologiques ainsi que du retour d'expérience du fonctionnement de l'INB notamment lors du développement progressif des zones de stockage ;
  - ✓ d'autre part, de faire évoluer la stratégie ou les modalités de fermeture de l'INB (cf. Pièce 13 « Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance » (1)).

De manière concrète, cela se traduit par la prise en compte :

- d'évolutions du conditionnement pour certains colis de l'inventaire retenu pour la conception et la démonstration de sûreté au stade des études d'avant-projet, en particulier ceux dont le conditionnement est à ce stade à l'état de recherche avec un impact possible sur leur nombre et leur volume global au-delà des marges[1] prises (2) ;
- d'évolutions de livraisons par les producteurs (aléas ou stratégies industrielles) et de modifications des flux de réception ;
- d'évolutions de modes de stockage en conteneur et/ou directement sans mise en conteneur selon les familles de déchets ;
- des deux voies de gestion possibles des déchets bitumés compte tenu des incertitudes résiduelles sur leur mode de conditionnement pour leur mise en stockage : le stockage de colis de déchets bitumés mis en conteneurs renforcés vis-à-vis de l'incendie ou le stockage de colis de déchets MA-VL après traitement des déchets bitumés ;
- des évolutions d'inventaire de colis de déchets (nombre de colis) et donc du nombre d'alvéoles, en conséquence des précédentes évolutions ;
- des changements de stratégie et/ou modalités de fermeture.

[1] L'annexe 1 de la note « Inventaire de référence retenue pour la conception et la démonstration de sûreté de Cigéo au stade des études d'avant-projet » (2) présente les principes retenus vis-à-vis des marges estimées par les producteurs.

Avant d'aborder les aspects conception (cf. Chapitre 2 du présent volume) et sûreté (cf. Chapitre 3 du présent volume) propre à chaque type de flexibilité, la suite du présent chapitre présente la stratégie retenue en termes de flexibilité pour chacune des typologies d'évolution.

1.1 Des évolutions du conditionnement de certaines familles de déchets[2]

En réponse au 3e alinéa de l'article D. 542-91 du code de l'environnement, la demande d'autorisation vise la création de l'INB Cigéo pour accueillir les déchets de l'inventaire de référence (2), à savoir des déchets radioactifs de haute activité (HA) et moyenne activité à vie longue (MA-VL). Ces déchets sont issus des installations nucléaires disposant de leur décret d'autorisation de création à la date de définition de l'inventaire de référence.

L'inventaire de référence constitue la base de la conception initiale et de la démonstration de sûreté associée de l'INB au stade des études en avant-projet. Cet inventaire présente les différentes familles de colis de déchets en termes de natures, nombres et volumes incluant les marges retenues (2). Pour certains déchets non encore conditionnés ou non encore produits à ce stade, des hypothèses de conditionnement sont retenues (cf. Volume 3 du présent rapport).

Selon le type d'évolution des hypothèses de conditionnement, l'exploitation de l'INB peut soit être poursuivie sans modification, soit nécessiter au préalable quelques évolutions mineures sur les équipements de manutention et/ou les modes d'exploitation (outils de préhension, contrôles spécifiques, rééquipements ponctuels…).

La flexibilité d'exploitation vis-à-vis de l'inventaire de colis à stocker s'appuie sur la prise en compte :

- de nombres/volumes de colis par famille : les nombres de colis par famille sont établis à partir des éléments fournis par les producteurs de déchets ; ils intègrent des marges dans leur estimation selon des principes présentés en annexe 1 de la note « Inventaire de référence retenu pour la conception et la démonstration de sûreté de l'INB Cigéo au stade des études d'avant-projet » (2). Le cumul des marges prises pour chaque famille offre une flexibilité à de potentielles évolutions de nombres/volumes pour certaines d'entre elles ;
- de grandeurs caractéristiques retenues par typologie de colis de stockage pour la phase de fonctionnement (cf. Volume 3 du présent rapport). Ces grandeurs caractéristiques permettent de couvrir la diversité des familles de colis de déchets et comprennent des marges ; elles sont utilisées pour le dimensionnement des différents ouvrages et équipements de l'INB. Elles contribuent à la définition du domaine de fonctionnement de l'installation ;
- d'inventaire radiologique dit « inventaire à terminaison margé » retenu pour l'évaluation de sûreté après fermeture à long terme ; un facteur de marge est appliqué à chaque famille de colis de déchets selon son niveau de connaissances (cf. Volume 3 du présent rapport) ;
- de capacités de co-stockage permettant d'encadrer les possibilités de stockage des colis de déchets MA-VL de caractéristiques différentes au sein des alvéoles de stockage, selon des règles établies sur la base de critères géométriques et physico-chimiques.

La conception initiale et la démonstration de sûreté intègrent un niveau de conservatisme qui se fonde sur des méthodologies de prise en compte des caractéristiques physico-chimiques et radiologiques des colis primaires sur la base de leur état de connaissance en phase de conception, déjà présentées dans le « Dossier d'options de sûreté » (3, 4). Ces méthodologies jugées satisfaisantes lors de son instruction, sont reconduites et présentées dans le volume 3 du présent rapport.

Toute évolution de caractéristiques physico-chimiques et radiologiques des colis de déchets ainsi que toute évolution de conditionnement (et de nombre de colis en conséquence) restent envisageables après le dépôt du dossier de demande d'autorisation de création (DAC) dès lors qu'elles restent dans le domaine des spécifications d'acceptation des colis (5). Dans le cas contraire, elles devront être évaluées *via* un processus de gestion des modifications vis-à-vis des spécifications d'acceptation des colis.

[2] Cela concerne en particulier les familles de déchets pour lesquels le conditionnement est encore à l'état de recherche ou pour lesquelles le conditionnement est en cours de définition.

1.2 Des évolutions de livraison des colis

La flexibilité aux livraisons des colis de déchets s'entend comme la possibilité de réceptionner les colis primaires de déchets selon un volume ou un ordre différent de celui envisagé d'une part au moment de la conception initiale et d'autre part pendant la phase de fonctionnement.

En l'occurrence le nombre de colis de chaque type attendu par an, influe sur les choix de conception (en particulier le process et ses différentes étapes : réception, entreposage tampon, transfert…) et les modes d'organisation futurs de l'INB (conduite, maintenance…). De fait, des changements de livraison peuvent intervenir selon les évolutions de stratégies des producteurs ou les contraintes opérationnelles internes ou externes aux producteurs.

En phase de fonctionnement lors d'une séquence de remplissage d'alvéole, un changement de livraison nécessite d'analyser son impact sur l'organisation globale de l'exploitation et principalement la possibilité de changer tout ou partie des colis prévus pour finir le remplissage de l'alvéole. Les éléments suivants montrent le niveau de flexibilité qu'offre l'INB en regard des dispositions conservatoires retenues :

- l'installation est globalement conçue de telle sorte que ses conditions de sûreté ne dépendent pas de l'ordre de livraison des colis ;
- le niveau de flexibilité du bâtiment nucléaire de surface (EP1) reste toutefois lié à ses capacités :
  - ✓ de réception des wagons d'emballage de transport au niveau du terminal ferroviaire ;
  - ✓ d'entreposage en zone tampon des colis primaires et de stockage influant de fait la gestion des flux de colis entre EP1 et les ouvrages de stockage.
- au niveau des alvéoles de stockage, en phase de fonctionnement, le niveau de flexibilité de l'exploitation reste lié aux marges prises en matière de dimensionnement, notamment des alvéoles (ventilation, équipement de manutention, dimensionnement des protections radiologiques…).

Les études de conception visent à stocker différentes familles de colis de déchets dans un même alvéole. Pour cela, les familles de colis de déchets MA-VL sont classées en sept catégories physico-chimiques[3] compte tenu de leurs natures et des règles de co-stockage associées qui sont de deux ordres : géométrique (compatibilité par exemple avec la largeur de passage de fourche du moyen de manutention) et physico-chimique (compatibilité par exemple avec les autres colis stockés). Les sept catégories physico-chimiques de familles de déchets MA-VL sont les suivantes :

- MA-VL1 : colis de déchets contenant une quantité significative de sels (hors déchets bitumés) ;
- MA-VL2 : colis de déchets bitumés ;
- MA-VL3 : colis de déchets contenant des matières organiques (ou autre constituant du colis hors matrice) ;
- MA-VL4 : colis de déchets non ou faiblement exothermiques cimentés (ne contenant ni matière ni sels) ;
- MA-VL5 : colis de déchets non ou faiblement exothermiques non cimentés ne contenant ni matière organique ni sels, notamment les déchets de structure issus du retraitement des combustibles ;
- MA-VL6 : colis de déchets vitrifiés, non ou faiblement exothermiques, éventuellement après une phase préalable d'entreposage de décroissance qui permet de les déclasser de la catégorie HA0 ;
- MA-VL7 : colis de déchets sodés.

Cette classification offre un niveau de flexibilité de l'exploitation pour les familles appartenant à chaque catégorie. La flexibilité de l'INB à toute évolution de livraison des colis reste toutefois encadrée par ces règles de co-stockage.

[3] Dans la continuité des options de sûreté

Pour s'affranchir au maximum des incidences liées aux fluctuations possibles de livraisons de colis sur l'INB, la démonstration de sûreté s'appuie sur une approche conservative en considérant :

- des grandeurs caractéristiques représentatives des familles de colis de déchets (cf. Volume 3 du présent rapport) vis-à-vis des fonctions de sûreté à assurer et des risques à maîtriser ;
- une distribution de l'inventaire radiologique « fictive » dans la démonstration de sûreté après fermeture à long terme dès la conception initiale pour s'affranchir le plus possible de toute évolution de livraison (cf. Chapitre 1 du volume 8 du présent rapport) :
  - ✓ pour le quartier de stockage MA-VL, la distribution de l'inventaire repose sur une répartition qui consiste :
    - au remplissage des alvéoles de stockage par activité décroissante depuis le fond du quartier de stockage MA-VL ;
    - à classer les familles de colis de déchets par activité linéique décroissante ($Bq.m^{-1}$ linéaire de l'alvéole de stockage en tenant compte des modalités de stockage (empilements) et du co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL.
  - ✓ pour le quartier de stockage HA, la distribution retenue pour les inventaires HA est déterminée en relation avec le dimensionnement thermique, offrant une flexibilité plus limitée.

1.3 Des changements de modes de stockage des colis

Une évolution de conditionnement peut induire éventuellement une évolution du mode de stockage. Les alvéoles de stockage MA-VL sont construits et mis en service pour être en mesure d'accueillir des colis de déchets MA-VL selon deux modes de stockage :

- colis primaires directement stockés (avec ou sans panier) ;
- colis primaires stockés après mise en conteneur de stockage dans l'installation nucléaire de surface.

Les alvéoles de stockage HA sont construits et mis en service pour être en mesure d'accueillir des colis de déchets selon un seul mode de stockage : un colis primaire stocké après mise en conteneur de stockage dans l'installation nucléaire de surface.

Le mode de stockage retenu est fonction des caractéristiques des colis et du respect des spécifications d'acceptation. Le fait de pouvoir disposer du choix en termes de mode de stockage est un atout en termes de flexibilité de l'exploitation.

1.4 Des évolutions du nombre de colis et d'alvéoles

La flexibilité de l'INB vis-à-vis d'une possible évolution du nombre d'alvéoles est principalement assurée par :

- un inventaire de référence qui retient un nombre de colis de déchets avec des marges prises par les producteurs ;
- le déploiement progressif des zones de stockage *via* la mise en service de tranches successives d'alvéoles de stockage pendant la phase de fonctionnement ;
- la conception des différents quartiers de stockage HA et MA-VL permettant d'intégrer cette progressivité dans des conditions sûres.

À titre d'exemple pour les colis MA-VL, la conception de l'installation souterraine permet l'ajout progressif de nouveaux alvéoles à l'intérieur ou à l'extérieur de la « boucle » du quartier de stockage MA-VL telle que définie en vue de la première mise en service (cf. Chapitre 2 du présent volume).

1.5 Des changements de stratégie en matière de fermeture du stockage

L'Andra prévoit une stratégie de fermeture du stockage présentée dans le plan de démantèlement et de fermeture du stockage (cf. Pièce 13 « Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance » du dossier de DAC (1)).

D'autres stratégies de fermeture envisageables pourraient être, en tout ou partie, retenues si des éléments nouveaux (cf. Pièce 16 « Plan directeur de l'exploitation » du dossier de demande d'autorisation de création (DAC) (6)) sont identifiés pendant toute la durée de vie de l'installation. Cette stratégie peut ainsi évoluer.

La conception actuelle de l'INB permet des évolutions de la stratégie de fermeture correspondant à l'anticipation ou au report des opérations proposées selon le positionnement et les choix des générations futures.

Ainsi, le schéma de fermeture proposé dans le dossier de demande d'autorisation de création (DAC) n'est pas figé. Le développement progressif de l'exploitation (cf. article L. 542-10-1) offre la possibilité de schémas de fermeture plus progressifs et anticipés ou, inversement, plus concentrés dans le temps à la fin du fonctionnement. Conformément à la décision du 21 février 2020 consécutive au débat public dans le cadre de la préparation de la cinquième édition du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) (7), le PNGMDR « *précisera les conditions de mise en œuvre de la réversibilité du stockage […], les jalons décisionnels du projet Cigéo ainsi que la gouvernance à mettre en œuvre afin de pouvoir réinterroger les choix effectués* ».

2

Les dispositions de conception et d'organisation prévues pour assurer la flexibilité pendant l'exploitation de l'INB

2.1 La flexibilité face à des évolutions du conditionnement des déchets 14
2.2 La flexibilité face à des évolutions de livraison des colis 18
2.3 La flexibilité face à des changements de modes de stockage des colis 20
2.4 La flexibilité face à une évolution du nombre de colis et d'alvéoles 20
2.5 La flexibilité face à des changements de stratégie en matière de fermeture du stockage 22

Comme indiqué *supra*, la flexibilité d'exploitation telle que déclinée par l'Andra correspond à la capacité de l'INB à s'adapter au cours du temps à des variabilités ou incertitudes concernant la réception des colis primaires de déchets radioactifs de l'inventaire de référence (2), leur conditionnement ainsi que la fermeture de l'installation.

Ce chapitre présente les dispositions de conception et d'organisation pour assurer la flexibilité pendant l'exploitation pour chacune des différentes typologies de flexibilité présentées au chapitre 1 du présent volume, en l'occurrence la flexibilité :

- à des évolutions du conditionnement des colis de l'inventaire de référence ;
- à des évolutions de livraison des colis de déchets ;
- à des changements de modes de stockage au cours du temps ;
- à une fluctuation du nombre d'alvéoles (qui peut être une conséquence des précédents items) ;
- à des changements de stratégie en matière de fermeture.

2.1 La flexibilité face à des évolutions du conditionnement des déchets

Comme indiqué dans le volume 3 du présent rapport, les familles de colis de déchets (2) sont regroupées en quatre catégories suivant l'état de leur production voire de la définition de leur mode de conditionnement :

- les familles de colis dont la production est terminée ;
- les familles de colis en cours de production, pour lesquelles le conditionnement des déchets est défini et une spécification de production existe ;
- les familles de colis non encore produits à ce jour mais dont la définition du conditionnement des déchets est déjà bien avancée ;
- les familles de colis non encore produits à ce jour et dont le conditionnement est encore à déterminer.

Les évolutions de conditionnement concernent donc majoritairement la quatrième catégorie (presque exclusivement des familles de colis MA-VL) et la troisième catégorie (sachant que les colis HA présentent une variabilité nettement moindre par la nature des déchets et le conditionnement en matrice verre). Ces évolutions pourraient conduire à des définitions de nouvelles familles et d'identifiants et potentiellement à des changements de mode de conditionnement (cf. Chapitre 2.3 du présent volume).

Les fûts de déchets bitumés bien que produits, constituent un cas spécifique. En effet, ils peuvent faire l'objet d'un reconditionnement afin de constituer le colis primaire de déchets bitumés qui sera stocké dans l'INB Cigéo (cf. Chapitre 4 du présent volume).

Les équipements du process nucléaire et les installations de surface et de fond, rendent possible une adaptation de l'INB aux évolutions potentielles des colis de l'inventaire de référence par :

- une conception initiale qui intègre l'ensemble des colis de déchets de l'inventaire et leur variabilité :
  - ✓ la standardisation des équipements et des ouvrages mise en œuvre à l'échelle de l'installation nucléaire ;
  - ✓ la mutualisation des équipements pour assurer plusieurs fonctions.
- le déploiement graduel des installations en surface et en souterrain qui offre une flexibilité supplémentaire compte tenu des horizons de temps longs permettant en effet d'ajuster la conception et la réalisation de ces futurs ouvrages à de nouveaux besoins et en particulier à d'éventuelles évolutions des colis de l'inventaire de référence quelle qu'en soit la nature.

2.1.1 La flexibilité apportée par des dispositions en matière de process nucléaire

La flexibilité de prise en charge des colis de l'inventaire est apportée essentiellement par les dispositions de conception liées à la standardisation des équipements du process nucléaire et des moyens de manutention associés.

Les installations et équipements (moyens de manutention/transferts) sont conçus pour gérer l'ensemble des colis primaires/colis de stockage HA et MA-VL de l'inventaire de référence et en particulier la variabilité de leurs caractéristiques physico-chimiques et de leur niveau de connaissance.

En réponse à ce besoin, il est retenu comme principe une exploitation de l'INB durable et reconfigurable, cohérente à chaque instant avec le juste besoin tout en assurant la compatibilité avec les besoins de flexibilité. Ce principe qui est décliné ci-après pour les équipements du process nucléaire, pour les installations de surface et de fond, rend possible une adaptation de l'INB aux évolutions potentielles des conditionnements des colis de l'inventaire de référence, par le choix :

- de privilégier dès la conception une standardisation des équipements et des ouvrages mise en œuvre à l'échelle de l'installation nucléaire ;
- de mutualiser des équipements pour plusieurs fonctions (par exemple des équipements de manutention et de transfert multifonctions).

À ce titre, il est privilégié de transférer des colis par des équipements standardisés (cf. Volume 5 du présent rapport) correspondant à :

- des moyens de transfert en surface (machine de levage limitée (MLL), navette) et en souterrain (funiculaire chariots, navette HA et MA-VL) présentant des interfaces standards avec les différents types de hottes HA et MA-VL :
  - ✓ le nombre de hottes MA-VL est optimisé au travers d'une conception standard (conception identique mais de gabarits différents et optimisés vis-à-vis des différents gabarits de colis) ; elles sont de trois types pour l'ensemble des colis à transporter ; les cavités internes sont ajustables par l'intermédiaire de jeux de cales pour prendre en compte les caractéristiques dimensionnelles de l'ensemble des colis ;
  - ✓ les hottes HA sont d'un seul type et permettent de transporter l'ensemble des colis de stockage HA.
- des moyens de transfert en surface (MLL, navette) et en souterrain (funiculaire, chariots) communs à toutes les hottes ;
- des engins de manutention et de transfert dimensionnés sur la base du gabarit de la hotte la plus lourde. Des colis de masse potentiellement plus élevée pourront, le cas échéant, être acceptés compte tenu que le gabarit de hotte la plus lourde est majoré de 10 % par rapport à la masse réelle (100 tonnes considérées contre 90 tonnes en réel) ;
- des navettes dédiées à chaque galerie d'accès desservant les alvéoles de stockage (HA ou MA-VL) identiques entre elles ;
- des cellules de manutention des alvéoles MA-VL sont de conceptions globalement similaires, adaptées en tant que de besoin à la géométrie des colis de déchets à stocker : leurs équipements sont standards (exemples : sas, robots d'intervention et d'inspection, robots de contrôle de la non-contamination, système d'extinction incendie, motorisation des ponts stockeurs, armoire électrique, contrôle commande…) ;
- des robots pousseurs identiques pour tous les alvéoles HA permettant d'amener les colis de déchets HA à leurs positions de stockage dans l'alvéole ;
- des voies de roulement avec des rails et des entraxes standards compatibles avec l'ensemble des moyens de transfert de l'INB tels que les chariots et navettes.

2.1.2 La flexibilité apportée par le déploiement progressif des ouvrages en surface et souterrains

Le déploiement progressif des ouvrages en surface et des ouvrages souterrains offre une flexibilité supplémentaire compte tenu des horizons de temps longs permettant d'ajuster la conception et la réalisation de ces futurs ouvrages à de nouveaux besoins et en particulier à d'éventuelles évolutions des colis de l'inventaire de référence quelle qu'en soit la nature (2).

2.1.2.1 Le déploiement progressif des ouvrages en surface

Les études de conception en avant-projet prennent en compte les besoins d'évolution au travers des dispositions constructives permettant la réalisation d'ouvrages en tranches ultérieures, notamment l'ouvrage de déchargement des emballages à déchargement horizontal (ET-H) et le bâtiment nucléaire d'exploitation phase 2 (EP2) en vue du stockage des colis HA1/HA2 décrits ci-après dans l'encadré en rappel du volume 5 « description de l'INB et de son fonctionnement » du présent rapport.

Il est à ce stade considéré en termes de déploiement :

- **le déploiement de l'ouvrage de déchargement des emballages à déchargement horizontal ET-H (ouvrage ET-H) qui permet :**
  - ✓ une réception des colis primaires de déchets MA-VL transportés par des emballages à déchargement horizontal, à la mise en service de ET-H en tranche ultérieure ;
  - ✓ la surface, d'environ 4 400 m², nécessaire à la construction de l'ouvrage ET-H est prévue à l'est du bâtiment nucléaire de surface EP1 ; le bâtiment nucléaire de surface EP1 est conçu pour permettre et faciliter la jonction avec cet ouvrage en tranche ultérieure, se concrétisant par :
    - la définition d'un mur fusible[4] permettant la jonction d'EP1 à l'ouvrage ET-H ;
    - la possibilité de raccorder l'ouvrage de déchargement des emballages à déchargement horizontal par un tunnel de transfert qui permet la mutualisation du transbordeur, et assure une continuité de la manutention entre les deux ouvrages ;
    - la faisabilité d'étendre les réseaux le nécessitant d'EP1 vers l'ouvrage ET-H *via* ce tunnel de transfert (électricité de puissance, contrôle commande et conduite, fluides) ;
    - le dimensionnement des sous-stations électriques de l'INB pour disposer des puissances nécessaires pour le déploiement électrique des réseaux vers l'ouvrage ET-H ;
    - la conception modulaire de l'architecture de contrôle-commande (ajout aisé de modules spécifiques pour l'ouvrage ET-H dans l'architecture contrôle-commande de l'INB) ;
- **le déploiement du bâtiment nucléaire de surface EP2,** dont la mise en service est prévue à l'horizon 2080, génère une flexibilité qui permet d'adapter et d'optimiser en temps utile la conception et la construction de ce nouveau bâtiment, notamment pour prendre en compte des éventuelles évolutions sur les colis de déchets HA (conteneur de stockage, conditionnement des colis destinés au quartier de stockage HA...) :
  - ✓ la surface nécessaire d'environ 20 000 m² pour la création de l'ouvrage est prévue à l'est de la tête de descenderie colis ;
  - ✓ comme pour l'ouvrage ET-H, des dispositions de conception prises dans la conception initiale pour faciliter la construction et le raccordement ultérieurs de ce bâtiment aux ouvrages existants de l'INB. Ces dispositions se traduisent par :
    - un ouvrage de jonction avec mur fusible permettant un raccordement facilité d'un tunnel à l'est de la tête de descenderie : ce tunnel d'environ 40 mètres de long a pour fonction d'acheminer les hottes du bâtiment nucléaire de surface EP2 vers la tête de descenderie ;

[4] Mur dont la déconstruction est rendue aisée par des dispositions prises à sa conception et mis en œuvre dès sa construction.

- la construction du bâtiment nucléaire de surface EP2 pouvant être réalisée en chantier clos et indépendant pour simplifier la maîtrise des risques liées à la coactivité des futurs travaux et de l'exploitation ;
- la définition d'un dispositif de sas permettant de continuer à exploiter EP1 jusqu'à la mise en service d'EP2.

La figure 2-1 ci-après présente la vue en plan des futurs ouvrages ET-H et EP2 au sein des installations de surface de la zone descenderie.

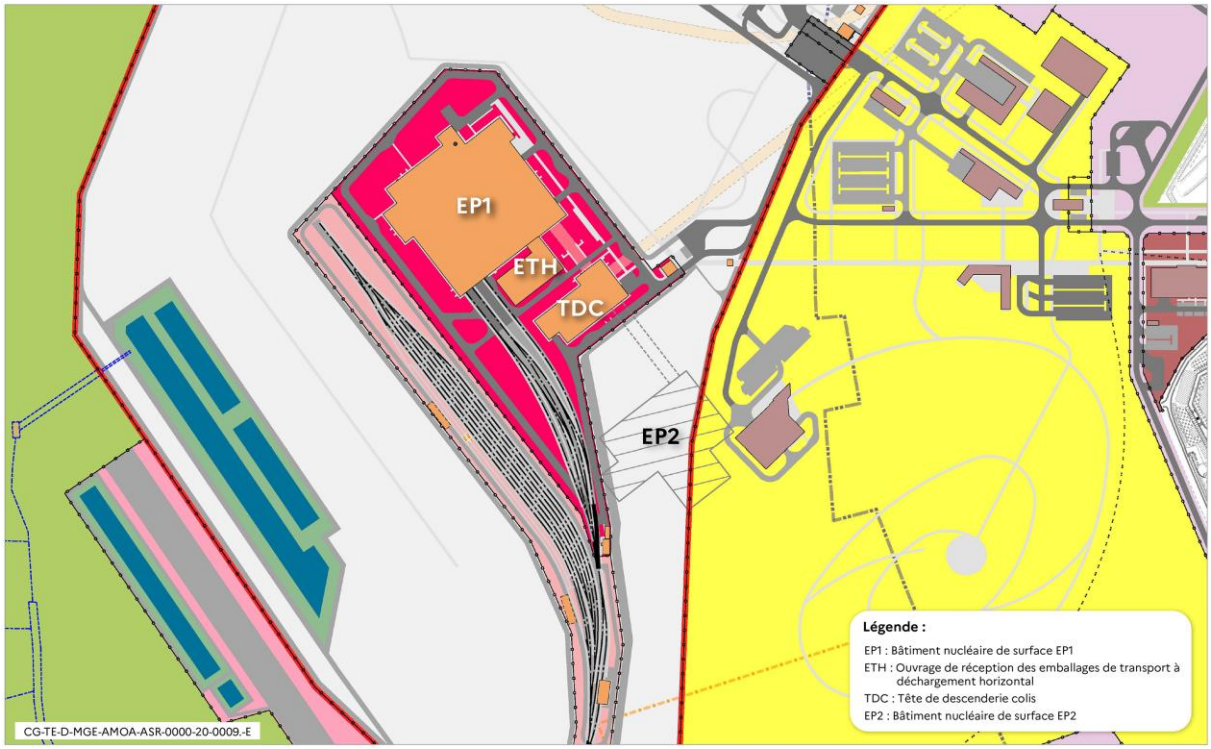


Figure 2-1 *Illustration de l'implantation des ouvrages de surface et en particulier des futures constructions ET-H et EP1*

2.1.2.2 Le déploiement progressif des zones de stockage HA et MA-VL

Les zones de stockage HA et MA-VL en souterrain sont déployées en plusieurs tranches.

Vis-à-vis de la construction des nouvelles tranches au sein du quartier de stockage MA-VL, compte tenu du caractère polyvalent et standardisé des alvéoles MA-VL, la flexibilité à la nature des colis à stocker est maximale tant que l'alvéole de stockage n'est pas équipé. Une fois l'alvéole équipé, la flexibilité reste encore possible avec le changement de quelques équipements, le cas échéant *via* des reprises sur le génie civil intérieur.

Concernant les quartiers HA, il n'y a pas d'équipements différenciés compte tenu d'alvéoles de conception similaire. La flexibilité à l'évolution des colis de l'inventaire de référence est de ce fait non contrainte par les ouvrages souterrains nécessaires au stockage des colis HA, sous réserve du respect des règles de chargement par sous-quartier en lien avec le dimensionnement thermique (cf. « Dossier de justification des choix d'architecture souterraine » (8)) : stockage au sein des sous-quartiers de stockage HA, se caractérisant par des entraxes différents, des colis HA1/HA2 ayant la thermicité *ad hoc*.

Au-delà de cette flexibilité intrinsèque de la conception pour répondre à des évolutions ultérieures des colis de l'inventaire de référence, le déploiement progressif par tranche permet des optimisations de conception possibles de :

- l'architecture d'un quartier ;
- la longueur des alvéoles ;
- l'orientation des galeries et des alvéoles ;
- l'entraxe des alvéoles HA ;
- l'aménagement interne des alvéoles MA-VL.

Cette flexibilité dépend des hypothèses structurantes associées au déploiement progressif de l'installation souterraine, en particulier :

- une construction du quartier de stockage HA à l'horizon 2080 : la prise en charge des colis HA1/HA2 ne pourra intervenir avant cette date. Au sein de ce quartier une construction des alvéoles par tranches, à ce stade en quatre sous-quartiers ;
- une construction du quartier de stockage MA-VL par tranches, avec un nombre d'alvéoles MA-VL variables.

2.2 La flexibilité face à des évolutions de livraison des colis

La notion de flexibilité aux livraisons de colis recouvre une flexibilité à l'ordonnancement des colis dans les alvéoles ainsi qu'une flexibilité à la cadence de mise en stockage.

À cela s'ajoute aussi la possibilité, vis-à-vis des aspects de réception des emballages de transport de colis, d'accueillir deux voies ferrées complémentaires sur le terminal ferroviaire nucléaire si les flux sont amenés à augmenter.

2.2.1 La flexibilité liée à l'ordonnancement du stockage des colis

La flexibilité liée à l'ordre de stockage des colis dans les alvéoles dépend des dispositions de conception présentées dans le chapitre précédent dédiées à la flexibilité aux évolutions potentielles des colis de l'inventaire de référence.

La flexibilité d'exploitation de l'INB vis-à-vis des colis MA-VL de l'inventaire de référence est assurée *via* la prise en compte de marges en termes :

- de règles de co-stockage pour permettre et encadrer les possibilités de stockage des colis de déchets MA-VL de caractéristiques différentes au sein des alvéoles de l'installation souterraine selon des critères géométriques et des critères physico-chimiques ;
- de possibilité, en lien avec le développement progressif, de faire évoluer, le cas échéant, la construction des alvéoles MA-VL en modifiant les aménagements internes de l'alvéole MA-VL pour s'adapter aux livraisons réelles ;
- de standardisation des dispositifs de stockage des colis (hotte, funiculaire…).

À cela s'ajoute, la possibilité de construire et de mettre en service, au sein du quartier de stockage MA-VL, de nouveaux alvéoles sans attendre un complet remplissage des alvéoles déjà en service et sans interruption de leur exploitation ; ceci est rendu possible par la gestion de la coactivité des opérations de construction et d'exploitation en particulier par leur séparation physique.

L'ordonnancement des colis de stockage dans un alvéole doit toutefois se faire et être établi puis suivi en cohérence avec les chroniques de livraison dans le cas d'un co-stockage de colis de stockage de géométrie différente.

Pour les colis HA, la flexibilité :

- est limitée par l'organisation du quartier de stockage HA en quatre sous-quartiers de stockage HA caractérisés par des entraxes différents, et adaptés à la thermicité des colis HA1/HA2 qu'ils accueillent ;
- est facilitée par la possibilité de construire et d'exploiter des sous-quartiers de façon progressive en fonction des besoins pour ne pas obérer les évolutions futures.

2.2.2 La flexibilité liée à la cadence de stockage

Les opérations d'exploitation (la réception et le déchargement des colis primaires des emballages de transport, leur mise en conteneur de stockage ou en panier pour les colis de déchets MA-VL concernés, le transfert des colis de stockage depuis la surface vers les ouvrages souterrains et leur chargement en alvéoles) peuvent absorber des évolutions de livraison.

Ceci peut se faire dans les limites du dimensionnement du flux admissible des installations (évaluées pour un fonctionnement annuel de 45 semaines en 2 × 8) à environ :

- 500 déchargements d'emballages de transport (à déchargement vertical) par an ;
- 400 colis de stockage pour le quartier pilote HA par an ;
- 1 100 colis de stockage MA-VL par an ;
- 2 200 colis de stockage pris en charge par le funiculaire par an.

La flexibilité aux livraisons est assortie à l'adaptation des rythmes de travail. Celle-ci sera mise en œuvre, de manière progressive, notamment lors de la phase industrielle pilote.

Par ailleurs, l'utilisation d'emballages alternatifs reste ouverte en flexibilité, compte tenu d'une part, des évolutions possibles de la réglementation et des agréments des emballages sur une longue période, d'autre part de la recherche d'optimisations pour certains emballages.

» NOTE IMPORTANTE

Le rythme de travail dans l'installation est actuellement prévu en 2 × 8 (travail posté).

Chaque filière du bâtiment nucléaire EP1 a un fonctionnement indépendant découplé par l'entreposage tampon principal. Cela permet de définir des rythmes de travail indépendants en amont et en aval de l'entreposage tampon. Il est ainsi possible, au début de la Phipil, de faire travailler l'ensemble des équipes en 1 × 8, puis après une phase de montée en charge, de passer en 2 × 8 pour la réception des emballages mais de rester en 1 × 8 pour les opérations en aval de l'entreposage tampon qui nécessitent moins de temps et de main-d'œuvre (fermeture des colis de stockage ou opérations de mise en hotte). Cela permet en l'occurrence d'adapter les effectifs de façon progressive.

Pendant la montée en charge depuis la phase industrielle pilote jusqu'à la charge maximale, les équipes peuvent ainsi passer d'un rythme 1 × 8 jusqu'au 3 × 8 (ou plus en 5 × 8 en cas de fortes charges) si nécessaire, de façon indépendante sur chaque filière de l'installation, ce qui offre de la flexibilité si les livraisons venaient à fortement augmenter.

Des améliorations des durées des opérations d'exploitation sont aussi envisagées pour accroître la performance et ainsi contribuer à la création de marges à associer à la flexibilité.

2.3 La flexibilité face à des changements de modes de stockage des colis

La flexibilité au mode de stockage concerne la possibilité de stocker, en conteneurs de stockage, certains colis primaires initialement destinés au stockage direct ou inversement.

Les colis HA sont stockés selon un mode de stockage unique de colis primaire en conteneur de stockage. Ils ne sont donc pas concernés par cette flexibilité.

En revanche, pour les colis de stockage MA-VL deux modes de stockage sont retenus :

- le stockage des colis primaires en conteneur de stockage (éventuellement renforcé vis-à-vis du confinement) ;
- le stockage des colis primaires directement (avec ou sans panier).

Dans le cadre de la flexibilité au mode de stockage des colis, il a été examiné la faisabilité d'une prise en charge en conteneur de stockage de certains types de colis initialement destinés au stockage direct tels que les CSD-C, C1PG^{SP}, 870L, 500L FI et CBF-C'2.

La flexibilité du mode de stockage de ces colis nécessite de pouvoir disposer :

- de conteneurs de stockage adaptés à ces colis ;
- de moyens de manutention et de transfert en alvéole de stockage adaptés ;
- d'alvéoles MA-VL supplémentaires compte tenu de l'accroissement de volume éventuellement induit par l'utilisation de conteneurs de stockage.

Une variabilité de modèles de conteneur de stockage est prévue et correspond à ces typologies de colis (géométries, masses en particulier). Les outils de manutention et de transfert en alvéoles sont par ailleurs compatibles avec tous ces conteneurs ainsi que les masses maximales de colis de stockage ainsi constitués.

De plus, la taille de la boucle du quartier de stockage MA-VL creusée au tunnelier permet d'accueillir quatre alvéoles en complément des 22 alvéoles de l'architecture illustrative présentée dans le chapitre 1 du volume 5 du présent rapport. Ceux-ci peuvent permettre de pallier l'accroissement du volume de colis à stocker résultant, par exemple, du changement de mode de stockage de certains colis primaires.

2.4 La flexibilité face à une évolution du nombre de colis et d'alvéoles

La flexibilité au nombre d'alvéoles HA est prise en compte *via* le développement progressif des quartiers de stockage et en particulier la mise en service du quartier de stockage HA à l'horizon 2080, lui-même déployé progressivement en sous-quartiers. Par ailleurs, la possibilité de stocker des colis HA0 dans le quartier pilote au-delà de la liste identifiée en phase industrielle pilote et dans une éventuelle extension est également une option ouverte au titre de la flexibilité.

Concernant les alvéoles MA-VL, le quartier de stockage présente une flexibilité en termes de nombre d'alvéoles (le nombre retenu à ce stade est d'une vingtaine d'alvéoles[5], cf. Volume 5 du présent rapport). L'extension du quartier de stockage MA-VL est possible et réalisable vers l'est du quartier *via* des dispositions conservatoires. En effet 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 a été considérée en tant que disposition conservatoire. L'ajout des nouvelles galeries permettant de construire le quartier de stockage FA-VL, mais aussi d'accueillir des colis de déchets MA-VL.

[5] En supposant le stockage des colis bitumés en l'état selon la conception retenue au chapitre 4.3.2

La construction des alvéoles de stockage de ce quartier pourra être réalisée lors des tranches ultérieures comme cela est déjà le cas pour le stockage des colis MA-VL porté dans la présente demande d'autorisation de création. Des zones au nord et au sud du quartier de stockage MA-VL autorisent des optimisations éventuelles (le cas échéant) avant la construction initiale *via* une extension du quartier dans ces directions qui serait rendue possible par l'augmentation des longueurs d'alvéole (sous réserve de justification notamment vis-à-vis du respect des gardes de Callovo-Oxfordien saines minimales au regard des contraintes de pente et de pendage de la couche du Callovo-Oxfordien). Le quartier de stockage MA-VL dispose ainsi d'une flexibilité significative pour permettre de stocker un volume de colis de stockage plus important dans le respect des règles de co-stockage.

Par ailleurs, sur la base de l'inventaire de référence retenu, la longueur de la partie utile de l'alvéole prévue à ce stade est au plus de l'ordre de 500 m. Lorsqu'un alvéole n'a pas besoin d'être rempli dans sa totalité, la longueur de la partie utile (partie où les colis sont stockés) est réduite au juste besoin[6]. Cette disposition offre une flexibilité à une éventuelle évolution (augmentation ou baisse) du nombre de colis dans le respect des règles de co-stockage retenues.

Les choix seront réalisés en temps voulu en lien avec le développement progressif de l'INB (cf. Chapitre 1 du volume 6 du présent rapport) en intégrant l'ensemble de ces considérations, les besoins des producteurs de déchets et les limites liées à la flexibilité des alvéoles.

Par ailleurs, il convient de considérer les flexibilités présentées ci-avant au regard de la date de l'évolution de l'inventaire de colis de déchets à stocker dans le quartier de stockage MA-VL par rapport à la construction des alvéoles. En effet, tant que l'alvéole n'est pas creusé, sa création peut être supprimée ou sa longueur peut être modifiée (raccourcissement ou allongement).

Une fois le tunnelier démonté, un alvéole creusé ne peut plus être allongé jusqu'à la longueur maximale possible. Même dans ce cas, l'alvéole garde une certaine flexibilité car il s'agit encore d'un tube au diamètre standard qui reste polyvalent tant qu'il n'a pas été équipé en interne. L'allocation à une catégorie géométrique et physico-chimique de colis de stockage peut donc être encore modifiée. En revanche, dès l'installation du génie civil secondaire interne de l'alvéole, les dimensions de la section utile au stockage de l'alvéole sont figées avec les configurations de colis de stockage pouvant y être déposés.

Ainsi, la flexibilité associée à l'augmentation du nombre d'alvéoles et en l'occurrence au volume de colis de déchets stockable est portée par :

- l'extension du quartier de stockage MA-VL réalisable vers l'est ;
- le dimensionnement des alvéoles MA-VL et la capacité à optimiser la longueur de la partie utile au juste besoin de stockage des colis ;
- le développement progressif de l'INB qui laisse le temps, tant pour les colis MA-VL que pour les colis HA d'adapter la capacité de stockage de l'INB au besoin.

Par ailleurs, que ce soit lors des phases de chantiers et travaux ou de mise en alvéole des colis de stockage, les principes structurants de conception, de réalisation et d'exploitation ne sont pas modifiés par la flexibilité associée au nombre d'alvéoles à construire, à ce titre :

- les risques liés à la construction et au déploiement, puis à l'équipement conventionnel, ne sont pas impactés ;
- l'augmentation ou la diminution des flux de matériels/matériaux et des opérations de maintenance permises par l'augmentation ou la réduction du nombre de colis/alvéoles sont marginales ;
- enfin, en termes d'impacts environnementaux conventionnels, ceux-ci ne sont pas significativement augmentés (incidence limitée sur les besoins de ressources, flux de construction et potentiellement le rythme des opérations de stockage au global de l'INB sur les phases de construction initiale et de fonctionnement).

[6] L'espace laissé vacant de l'alvéole est comblé avec des faux colis afin de satisfaire l'exigence de taux de vide. Une alternative toutefois, allant dans le sens de la préservation de la ressource rare du stockage qu'est le mètre cube de colis de déchets radioactifs stockés, est de laisser l'alvéole ouvert plus longtemps dans l'attente de nouveaux colis à stocker.

2.5 La flexibilité face à des changements de stratégie en matière de fermeture du stockage

Le schéma de fermeture du stockage proposé dans le « Plan de démantèlement, de fermeture et surveillance » (1) n'est pas figé. Le développement progressif de l'exploitation (cf. Article L. 542-10-1) offre la possibilité de schémas de fermeture plus progressifs et anticipés ou, inversement, plus concentrés dans le temps à la fin du fonctionnement. Conformément à la décision du 21 février 2020 consécutive au débat public dans le cadre de la préparation de la cinquième édition du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) (7), c'est le PNGMDR qui « *précisera les conditions de mise en œuvre de la réversibilité du stockage [...], les jalons décisionnels du projet Cigéo ainsi que la gouvernance à mettre en œuvre afin de pouvoir réinterroger les choix effectués* ».

Plusieurs scénarios sont envisageables pour la fermeture des quartiers de stockage MA-VL, pilote HA et de stockage HA. L'architecture souterraine est développée afin de pouvoir envisager l'intégration d'un de ces scénarios de fermeture à tout moment même après le début de l'exploitation de l'INB pendant la phase industrielle pilote (Phipil).

Le choix du scénario de fermeture n'a pas d'incidence sur la capacité de stockage de l'INB vis-à-vis de l'inventaire de référence. Il peut fermer, selon la stratégie retenue, la porte à la prise en charge de nouvelles populations de colis de déchets radioactifs dans les quartiers existants si ceux-ci sont fermés.

Selon les modalités de fermeture retenues, celles-ci ont également une incidence sur les modalités d'exploitation de l'installation (accès personnel/matériels, maîtrise de la coactivité, surveillance...) et sur la récupérabilité des colis (cf. Volume 13 du présent rapport).

Des scénarios de fermeture anticipés en particulier au sein d'un quartier de stockage ne sont pas retenus par l'Andra à ce stade notamment pour limiter les risques en exploitation (coactivités entre les opérations de fermeture et d'exploitation nucléaire par exemple) et pour préserver une capacité de surveillance du stockage le plus longtemps possible avant la fermeture définitive et de récupérabilité des colis de stockage sans devoir procéder à des opérations de réouverture.

Si les générations futures venaient à en décider autrement, ils seraient envisageables techniquement (cf. Volume 13 du présent rapport), sans modification significative du planning de réception, mais en contrepartie d'une réduction de la flexibilité de l'exploitation et de la prise en charge de nouveaux colis.

L'Andra a par ailleurs étudié des scénarios dans lesquels les opérations de fermeture de l'ensemble de l'installation souterraine sont engagées à la fin de la phase de fonctionnement. Ces scénarios ne sont pas retenus par l'Andra à ce stade, notamment parce qu'ils sont moins propices à l'acquisition d'un retour d'expérience suffisant et progressif sur les opérations de fermeture.

Toutefois, si les générations futures venaient à en décider autrement, ceux-ci seraient envisageables techniquement. En effet, les colis de stockage et les ouvrages de stockage sont conçus de façon suffisamment robuste pour que le calendrier de fermeture puisse être retardé sans préjudice pour la sûreté nucléaire.

Ainsi l'installation souterraine est conçue pour que les opérations de fermeture partielle puissent être engagées par l'exploitant dès qu'il en estimera la nécessité et selon la stratégie de fermeture retenue. En fonction du choix retenu, ces opérations peuvent être engagées, soit au plus tôt (dès la fin du remplissage des alvéoles), soit au plus tard (à la fin de la phase de fonctionnement), soit à des dates intermédiaires et selon la stratégie et les modalités de fermeture retenues. Le calendrier de fermeture est donc flexible et pourra être adapté dans le cadre de la réversibilité.

Principales dispositions de conception des ouvrages souterrains contribuant à assurer la flexibilité de l'INB Cigéo

Les principales dispositions de conception pour les ouvrages souterrains contribuant, en particulier, à la flexibilité sont résumées ci-après :

- dispositions d'architecture :
  - ✓ une architecture des galeries, centrées sur des zones de soutien logistique exploitation et travaux, qui permet d'éventuels déploiements de quartiers ;
  - ✓ une séparation dynamique et physique exploitation/travaux permettant la coactivité ;
  - ✓ un creusement graduel des alvéoles ajustable avec les livraisons des colis ;
  - ✓ des espaces libres pour l'extension des quartiers HA et du quartier de stockage MA-VL.
- dispositions pour le quartier de stockage MA-VL :
  - ✓ une boucle permettant la construction de 26 alvéoles (incluant les alvéoles pour le stockage de l'ensemble des colis de déchets bitumés s'ils étaient tous stockés en l'état et un alvéole supplémentaire) ;
  - ✓ l'extension du quartier de stockage MA-VL est également possible et facilement réalisable vers l'est du quartier ;
  - ✓ les alvéoles MA-VL[7] se distinguent entre eux par leurs aménagements internes respectifs, adaptés à la géométrie des différents colis de stockage qu'ils accueillent.
- dispositions pour le quartier de stockage HA :
  - ✓ des marges au nord pour le quartier de stockage HA permettant aussi d'adapter, le cas échéant, les nombres, les longueurs d'alvéoles.

[7] À l'exception d'un seul alvéole de diamètre excavé différent

3

L'analyse de la flexibilité du point de vue de la sûreté

3.1 L'analyse de la flexibilité du point de vue de la sûreté après-fermeture 26
3.2 L'analyse de la flexibilité du point de vue de la sûreté en exploitation 32

Ce chapitre fait le lien entre flexibilité et les volumes 8 et 9, du présent rapport, dédiés respectivement aux évaluations de sûreté après-fermeture et de sûreté d'exploitation en phase de fonctionnement.

Ces volumes présentent, en effet, les éléments (démarche retenue, hypothèses retenues) qui permettent de justifier que les typologies de flexibilité présentées au chapitre 1 du présent volume n'ont pas d'incidence sur la sûreté en l'occurrence les évolutions :

- des conditionnements des colis de l'inventaire de référence ;
- de livraisons des colis ;
- des changements de modes de stockage des colis au cours du temps ;
- du nombre de colis et donc d'alvéoles, ce qui peut être une conséquence des précédents items ;
- de la stratégie en matière de fermeture.

3.1 L'analyse de la flexibilité du point de vue de la sûreté après-fermeture

3.1.1 La flexibilité face aux évolutions du conditionnement des colis

Pour rappel, certains colis primaires ne sont pas encore produits ; parmi ceux-ci certains présentent des conditionnements encore à déterminer. Par ailleurs, comme indiqué au volume 8 du présent rapport, l'évaluation de la sûreté après-fermeture prend en compte l'ensemble des colis de l'inventaire une fois stocké et l'installation souterraine fermée définitivement. Aussi, celle-ci se fonde sur des hypothèses de conditionnement pour les colis mentionnés ci-avant.

Dans ce cadre, une évolution potentielle de conditionnement des déchets est susceptible d'avoir une influence sur :

- le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques hors des colis stockés, en tenant compte par exemple du rôle de la matrice vitreuse s'agissant des déchets vitrifiés HA ;
- les perturbations du Callovo-Oxfordien (perturbations physico-chimiques et thermo-hydro-mécaniques (THM)), par exemple si les colis de déchets contiennent davantage de sels, de matières complexantes/organiques ou ont des puissances thermiques plus importantes ;
- le risque de criticité par exemple si les colis de déchets concentrent davantage de matières fissiles ;
- le nombre de colis de déchets et leur volumétrie.

Les trois premiers points font l'objet d'un développement spécifique ci-après.

Le dernier point qui influe sur le nombre d'alvéoles et donc sur l'architecture en général est traité au chapitre 3.1.4 du présent volume qui lui est dédié.

3.1.1.1 Le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques hors des colis de déchets

Pour mémoire, le choix des modèles de relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques s'appuie sur le socle de connaissances scientifiques et technologiques relatif aux comportements des colis de déchets dans le stockage (cf. Volume 7 du présent rapport et le « Recueil des fiches bilans scientifiques et techniques » (9)).

Ces modèles influent toutefois peu sur les indicateurs de performance tels que les débits molaires en sortie du toit et du mur du Callovo-Oxfordien du fait des temps de transfert longs dans le Callovo-Oxfordien par rapport à la cinétique de relâchement des radionucléides correspondantes aux modèles de relâchement hors des colis (et par voie de conséquence influent peu sur les impacts à l'homme en termes de dose). Ceci est notamment illustré à travers les enseignements des situations de référence et enveloppe du scénario d'évolution normale (SEN) s'agissant des colis de déchets HA et MA-VL (cf. Chapitre 7 du volume 8 du présent rapport).

La démonstration de sûreté après-fermeture prend en compte plusieurs types de modèle de relâchement qui couvrent plusieurs types de conditionnement et de déchets (déchets vitrifiés, métalliques, salins, bitumés, bétons). Les choix conservatifs retenus pour la démonstration permettent de potentielles évolutions de conditionnement du point de vue de la cinétique de relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques. Pour les colis de déchets MA-VL dont le conditionnement reste à définir, la prise en compte de modèles de relâchement labile des radionucléides permet de facto une flexibilité vis-à-vis d'évolutions des hypothèses de conditionnement retenues à ce stade.

3.1.1.2 Les perturbations issues des colis de déchets

3.1.1.2.1 Les perturbations physico-chimiques

La majorité des colis HA et MA-VL ne contenant pas de sels ou de matières organiques, les perturbations chimiques associées sont négligeables.

La présence de sels ou de substances complexantes (en particulier provenant des matières organiques contenues dans les déchets) dans certains colis de déchets MA-VL est susceptible d'influer sur le transfert des solutés au sein de la couche du Callovo-Oxfordien. Afin de préserver les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien, des règles de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL sont donc établies afin de limiter l'influence des substances salines et/ou complexantes.

Pour tous les scénarios support à l'évaluation de la sûreté après-fermeture, il est par ailleurs retenu des hypothèses conservatives pour retranscrire l'influence des espèces salines et/ou complexantes. Ainsi, les panaches représentés sont, pour tous les alvéoles MA-VL d'une même catégorie physico-chimique contenant des matières organiques, estimés sur la base de la famille la plus riche en matière organique. Il en est de même s'agissant des déchets salins. Les résultats, en particulier de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, montrent que les panaches d'influence de ces espèces sont limités et n'atteignent pas la garde saine de la couche de Callovo-Oxfordien.

Toute évolution de conditionnement de colis de déchets MA-VL et en particulier sur les quantités des teneurs maximales en sels et/ou en matières organiques égales ou inférieures à ce que contiennent les colis de la famille la plus chargée est possible (cf. Prise en compte dans la démonstration de sûreté de la famille la plus riche en matière organique) avec la justification toutefois que la solution retenue a cherché à minimiser ces substances.

Dans le cas contraire, à savoir si un nouveau conditionnement de colis MA-VL conduisait à des teneurs maximales en sels et/ou en matières organiques supérieures à celles retenues dans les évaluations de sûreté après-fermeture présentées au volume 8 du présent rapport, l'acceptation au stockage serait subordonnée à une étude spécifique selon les processus définis au volume 6 du présent rapport.

3.1.1.2.2 Les perturbations thermique-hydraulique-mécanique (THM)

Les perturbations thermique-hydraulique-mécanique (THM) sont de nature à altérer les propriétés favorables de la couche du Callovo-Oxfordien, le facteur incident est la puissance thermique des colis. Elles sont prises en compte dans la conception du quartier pilote HA et des sous-quartiers du quartier de stockage HA lors de la définition de l'architecture souterraine pour les types de conditionnement retenus à ce stade. Pour le quartier de stockage MA-VL, une évolution du mode de conditionnement des colis de l'inventaire de référence ne présente pas d'enjeu vis-à-vis des perturbations THM en après-fermeture.

La prise en compte des contraintes THM dès la conception se traduit pour les colis HA stockés par des exigences exprimées en puissance thermique moyenne par famille et maximale par colis primaire dans la pièce 19 « Version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis » (5) et, par ailleurs, par la mise en place d'une distance entre alvéoles (entraxe).

Le dimensionnement thermique établi par sous-quartier du quartier de stockage HA offre la flexibilité nécessaire pour la prise en charge de colis futurs présentant des puissances thermiques différentes de celles initialement retenues sous-réserve toutefois d'ajuster le plan de chargement des alvéoles et de ne pas dépasser les puissances thermiques maximales acceptables par alvéole de stockage. Le cas échéant, si les évolutions de colis futurs portent sur une population de colis particulièrement importante ou/et présentant des puissances thermiques significatives dépassant les puissances thermiques maximales, des études spécifiques sont à mener, selon les processus définis au volume 6 du présent rapport, pour valider leur prise en charge en stockage vis-à-vis des perturbations THM.

3.1.1.3 La perturbation liée au risque de criticité

Afin de garantir le respect de la fonction « préserver les caractéristiques favorables des argilites du Callovo-Oxfordien et des composants impliqués dans la sûreté après-fermeture » vis-à-vis de perturbations liées au risque de criticité au sein des alvéoles qu'induit la présence de matières fissiles dans les colis, la démonstration de sûreté exclut l'occurrence d'une excursion critique sur le long terme après la fermeture du stockage (cf. Chapitre 2 du volume 8 du présent rapport).

Cette démonstration tient compte des données d'entrée suivantes pour lesquelles des choix pénalisants sont retenus conformément à l'approche classique d'étude de la sûreté-criticité :

- les caractéristiques géométriques et les matériaux des colis primaires et colis de stockage (cf. Volume 3 du présent rapport) situés dans l'environnement proche des matières fissiles ;
- la disposition initiale des colis dans les alvéoles de stockage ;
- les caractéristiques géométriques et les matériaux des alvéoles de stockage (cf. Volume 5 du présent rapport).

Le mode de contrôle retenu est la masse de matière fissile contenue dans les colis de déchets. Les études conduites, tenant compte de l'évolution sur le long terme des colis de déchets, définissent des limites de masses de matière fissiles pour la maîtrise de la sous-criticité à long terme. Elles sont présentées dans la pièce 19 « Version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis » (5). Pour la majorité des colis, la maîtrise de la sous-criticité à long terme est assurée par le respect des limites de masse fissile définies pour garantir la sûreté-criticité durant la phase de fonctionnement, la limite permettant de garantir la sûreté après-fermeture étant moins restrictive.

Les colis pour lesquels la limite de masse de matière fissile permettant de garantir la maîtrise de la sous-criticité après la fermeture est plus restrictive que celle définie pour garantir la sûreté-criticité durant la phase de fonctionnement relèvent du stockage direct. Si une partie de ces colis est déjà produite et leur conditionnement encadré par une spécification de production, une évolution de contenu en matières fissiles dans les futurs colis à produire pendant la phase de fonctionnement reste possible. Une option alternative au stockage direct est leur mise en conteneur de stockage (solution de stockage envisagée également dès la conception pour ces colis) permettant de bénéficier de masses maximales admissibles de matières fissiles supérieures à celles associées à ces mêmes colis lorsqu'ils sont stockés sans conteneur de stockage.

Pour certaines familles de colis non encore produits, une éventuelle légère augmentation de la masse de matière fissile contenue dans les colis n'aura pas d'incidence sur la maîtrise de la sous-criticité à long terme après-fermeture (le paramètre dimensionnement étant dans le cas courant la maîtrise du risque durant la phase de fonctionnement : (cf. Chapitre 3.2 du présent volume), cela d'autant plus que le retour d'expérience sur les colis produits montrent l'existence d'une marge entre valeur mesurée et valeur spécifiée.

Le cas échéant, comme pour la puissance thermique, si les nouveaux colis dépassent les masses maximales admissibles de matières fissiles, des études spécifiques de la faisabilité de leur prise en charge en stockage vis-à-vis du risque de criticité à long terme devront être menées selon les processus définis au volume 6 du présent rapport, pour considérer cette nouvelle population de colis.

3.1.2 La flexibilité face à des évolutions de livraison des colis

La chronique de livraison des colis primaires telle que définie actuellement avec les producteurs de déchets est susceptible d'évoluer dans le futur, ce qui induirait une distribution différente des colis de déchets dans les alvéoles de stockage.

Pour le quartier de stockage MA-VL, la distribution de l'inventaire en radionucléides retenue pour les évaluations de sûreté après-fermeture s'affranchit des incertitudes liées aux livraisons.

Pour les quartiers HA, l'évolution des livraisons est susceptible de modifier (i) les caractéristiques des colis au moment de leur livraison (DeD, puissance thermique) et (ii) la distribution de l'inventaire en radionucléides, retenue dans les évaluations de sûreté après-fermeture.

Concernant les caractéristiques des colis HA, la mise en œuvre d'une démarche qui relie la conception, la sûreté et la connaissance des colis conduit à la définition :

- de modèles standards de conteneurs de stockage. Ces modèles standards de conteneur permettent notamment de concilier l'atteinte des exigences définies (durée d'étanchéité minimale dans des conditions d'ambiance, notamment radiologiques, où les processus d'évolution sont maîtrisables, prédictibles et compatibles avec un dimensionnement) et la gestion optimisée de l'installation (surface et fond), le tout étant encadré par les spécifications d'acceptation des colis. La flexibilité à la chronique peut être prise en compte par l'adaptation de la conception des conteneurs (amincissement ou épaississement de l'épaisseur du conteneur) accompagnée d'adaptations (mineures) du process nucléaire et le cas échéant de diamètre des alvéoles ;
- d'une densité de chargement des colis au sein des alvéoles au sein du quartier pilote HA et des sous-quartiers du quartier de stockage HA (entraxes entre alvéoles) dans l'installation souterraine obtenue par dimensionnement thermique au regard du respect des critères afférents. Les évolutions de puissance thermique des colis associés aux évolutions de chroniques peuvent être compensées par le redimensionnement thermique du quartier pilote HA et des sous-quartiers du quartier de stockage HA (impactant le nombre d'alvéoles) rendu possible par le développement progressif de l'installation souterraine et la flexibilité de l'architecture (notamment *via* la conception modulaire en un quartier pilote HA et des sous-quartiers du quartier de stockage HA de la zone HA).

Concernant la distribution de l'inventaire en radionucléides retenue dans les évaluations de sûreté après-fermeture, elle correspond à celle des chroniques prévisionnelles de livraison supports au dimensionnement thermique des quartiers HA.

Pour mémoire, des études de sensibilité à la distribution des colis de déchets au sein du quartier de stockage MA-VL dont les résultats sont synthétisés au chapitre 11 du volume 8 du présent rapport, permettent d'évaluer l'influence de plusieurs modes de répartition de l'inventaire dans les alvéoles MA-VL sur les évaluations en après-fermeture :

- une distribution des colis MA-VL par activité décroissante en iode 129 depuis le fond du demi-quartier de stockage MA-VL nord et par activité décroissante en iode 129 depuis le fond de chacun des alvéoles. Pour rappel, il s'agit du mode de distribution retenu pour l'ensemble des évaluations des scénarios SEN, SEA, *What-if* présentés dans le volume 8 du présent rapport ; ce mode de distribution est celui conduisant à maximiser le débit molaire par la voie ouvrage car il consiste à localiser les inventaires radiologiques MA-VL les plus importants à proximité de la galerie de recoupe (nord-est du quartier de stockage MA-VL) en connexion avec la base des liaisons surface-fond ;
- une distribution des colis de déchets MA-VL par activité décroissante en iode 129 depuis le fond du demi-quartier de stockage MA-VL nord. Au sein de chaque alvéole, l'activité est ensuite considérée répartie de façon uniforme ;
- une distribution des colis MA-VL suivant la chronique prévisionnelle de livraison telle qu'envisagée à ce stade (cf. Chapitre 5 du volume 8 du présent rapport) ;
- une distribution de l'intégralité de l'inventaire radiologique MA-VL en iode 129 suivant une distribution uniforme au sein du quartier de stockage MA-VL (alvéoles tous identiques).

En regard des hypothèses retenues pour la distribution de l'activité radiologique en iode 129 au sein du quartier de stockage MA-VL et des alvéoles MA-VL, et plus particulièrement la distance moyenne séparant les inventaires MA-VL les plus importants de la base des liaisons surface fond (pour la situation enveloppe du scénario d'évolution normale, et pour les scénarios SEA et *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements reposant sur les paramètres de la situation de référence du scénario d'évolution normale) :

- le débit molaire maximal de radionucléides transitant par les liaisons surface-fond peut varier sur une plage d'environ un ordre de grandeur au maximum suivant les hypothèses ;
- le débit molaire maximal en iode 129 arrivant au toit de la couche du Callovo-Oxfordien est insensible aux hypothèses de distribution d'inventaire radiologique MA-VL et il demeure toujours supérieur à celui transitant par les ouvrages de liaison surface-fond).

Les résultats obtenus pour la distribution de l'inventaire radiologique conduisant à maximiser le débit molaire par la voie ouvrages ayant été retenue pour l'étude des deux situations du scénario d'évolution normale (cf. Chapitre 5 du volume 8 du présent rapport) ainsi que pour l'étude de tous les scénarios d'évolution altérée et de tous les scénarios de type *What-if* (cf. Chapitres 8 et 9 du volume 8 du présent rapport), permettent de couvrir les résultats obtenus pour toutes les autres chroniques de livraison de colis MA-VL étudiées. La distribution retenue permet ainsi de s'affranchir d'éventuels aléas de livraison.

3.1.3 La flexibilité face à des changements de modes de stockage des colis

3.1.3.1 Les perturbations physico-chimiques et thermo-hydro-mécaniques

Les colis initialement destinés au stockage direct ne contiennent ni substances salines ni substances complexantes ou organique de nature à perturber la couche de Callovo-Oxfordien.

Les perturbations thermo-hydro-mécaniques induites par la dissipation de la puissance thermique des colis MA-VL dans le stockage durant les phases de fonctionnement et après-fermeture sont prises en compte à la conception de l'installation.

Sous réserve du respect des limites de puissances thermiques maximales admissibles associées à la phase de fonctionnement (*i.e.* à la tenue du génie civil) implémentées dans la pièce 19 « Version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis » (5), la prise en charge de colis CSD-C, C1PG^{sp}, 870L, 500L et CBF-C'2 avec ou sans conteneur de stockage n'est pas de nature à altérer les propriétés favorables de la couche du Callovo-Oxfordien du fait d'une perturbation thermo-hydro-mécanique.

3.1.3.2 La sûreté-criticité en après-fermeture

Les deux modes de stockage « stockage direct » ou « stockage en conteneur de stockage des colis de type CSD-C, C1PG^{sp}, 870L, 500L et CBF-C'2 » sont retenus dans l'analyse du risque de criticité après-fermeture et des limites de masse de matières fissiles sont définies pour certains colis lorsque les masses maximales admissibles définies pour la phase de fonctionnement ne couvrent pas les risques de criticité après-fermeture.

Des limites de masse de matière fissile admissible différenciées en fonction du mode de stockage retenu sont établies en conséquence (cf. « Version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis » (5)).

Avec le respect des limites de masse associées à chacun des deux modes de stockage, la prise en charge de colis CSD-C, C1PG^{sp}, 870L, 500L et CBF-C'2 avec ou sans conteneur de stockage n'est pas de nature à remettre en cause la maîtrise du risque de criticité. Cela permet de garantir l'absence de perturbation liée au risque de criticité quelle que soit la répartition des colis dans les deux modes de stockage.

3.1.4 La flexibilité face à la variabilité des colis et au nombre d'alvéoles de stockage qui en résulte

Les études de sensibilité à l'architecture menées au chapitre 11 du volume 8 du présent rapport montrent que, pour un même inventaire radiologique à l'échelle du quartier de stockage MA-VL, l'ajout ou la suppression d'alvéoles qui pourrait résulter de la prise en compte d'un volume de colis de stockage (nombre et/ou dimensions) plus important ou *a contrario* plus faible que celui retenu en référence avec des concentrations en activité potentiellement différentes :

- est sans influence significative sur les débits molaires de radionucléides au toit de la couche du Callovo-Oxfordien qui est la voie de transfert dominante dans le cadre du scénario d'évolution normale, des scénarios d'évolution altérée ainsi que dans le cadre des scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements à l'exception du scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond et du scénario *What-if* de dysfonctionnement de l'ensemble des scellements (liaisons surface-fond et galeries) basés sur les paramètres de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale ;
- a une influence très limitée sur les débits molaires de radionucléides en sortie des liaisons surface-fond et au toit de la couche du Callovo-Oxfordien dans le cadre des deux scénarios *What-if* de dysfonctionnement des scellements précités.

Cette conclusion :

- vaut également pour les alvéoles HA situés en aval hydraulique des liaisons surface-fond et dont la contribution à la voie de transfert par la voie ouvrage est bien plus limitée que celle des alvéoles MA-VL en proportion de leurs inventaires respectifs ;
- est applicable aux substances toxiques chimiques.

3.1.5 La flexibilité face à des changements de stratégie en matière de fermeture

Les modalités de fermeture retenues pour la fermeture du quartier de stockage MA-VL du quartier pilote HA ainsi que du quartier de stockage HA n'ont pas d'influence sur la sûreté après-fermeture.

En effet, par la nature même de la démonstration de sûreté après-fermeture qui considère que toute l'installation souterraine est remblayée et scellée quel que soit le scénario, les fonctions de sûreté et exigences applicables aux composants importants pour la sûreté après-fermeture, en particulier les scellements, sont assurées.

Synthèse

L'installation de stockage Cigéo présente, vis-à-vis de la sûreté après-fermeture, une flexibilité :

- au mode de stockage des colis initialement destinés au stockage direct à savoir certains colis de type CSD-C, C1PG^{sp}, 870L, 500L et CBF-C'2. La pièce 19 « Version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis » (5) prévoit d'ores et déjà que tous les colis initialement destinés au stockage direct puissent être stockés en conteneurs de stockage ;
- au nombre d'alvéoles et au nombre de colis. La prise en compte d'une densification du stockage par diminution d'alvéoles MA-VL (stockage direct) n'a aucune conséquence en scénario d'évolution normale (SEN) sur les indicateurs de performance et de sûreté à long terme : le flux de radionucléides aux toit et mur de la couche du Callovo-Oxfordien (principale voie de transfert) est directement proportionnel à l'inventaire mobilisé, quelle que soit sa répartition au sein du quartier (stockage direct ou en conteneur). Les effets (limités) de concentration en radionucléides au niveau des quartiers, plus importants dans le cas du stockage direct, sont lissés au niveau des formations encaissantes au Callovo-Oxfordien du fait de la dilution/dispersion, et sans influence sur la concentration à l'exutoire.

Les choix conservatifs retenus en matière de distribution de l'inventaire radiologique dans la démonstration de sûreté après-fermeture tiennent compte des incertitudes relatives aux chroniques de livraison pendant la phase de fonctionnement et apportent des marges vis-à-vis d'aléas de livraison.

Enfin, toute évolution envisagée de conditionnement des déchets par rapport aux hypothèses de conditionnement (en particulier les teneurs en sels/substances complexantes et organiques, la puissance thermique et la masse maximale de matières fissiles par colis primaire) devra être analysée préalablement à sa mise en œuvre eu égard aux perturbations susceptibles d'être engendrées sur la couche de Callovo-Oxfordien et vis-à-vis du risque de criticité. Le cas échéant, des études spécifiques de la faisabilité de leur prise en charge en stockage vis-à-vis des perturbations à long terme peuvent être menées selon les processus définis au volume 6 de la présente version préliminaire du rapport de sûreté, pour considérer cette nouvelle population de colis.

3.2 L'analyse de la flexibilité du point de vue de la sûreté en exploitation

3.2.1 La flexibilité face aux évolutions du conditionnement des colis

La flexibilité de l'exploitation de l'INB permet de prendre en compte des évolutions potentielles du conditionnement des colis de déchets. Dans ce cadre, il est considéré la possibilité d'évolutions en termes, par exemple, d'inventaire radiologique, de géométrie de colis de déchets et de masse de colis. Cette flexibilité est encadrée par les spécifications d'acceptation des colis (5).

Tel que présenté dans le volume 3 du présent rapport, l'établissement des spécifications préliminaires d'acceptation des colis résulte de la mise en œuvre d'une démarche qui relie la conception, la sûreté et la connaissance des colis.

Les valeurs spécifiées ne sont donc pas uniquement le reflet de la connaissance des colis mais également d'une conception et de la démonstration de sûreté associée. De manière générale, les valeurs spécifiées fixent le domaine d'exploitation pour les colis pour chacune des caractéristiques valorisées dans la démonstration de sûreté.

Ainsi, une évolution des caractéristiques de colis de déchets est acceptable d'un point de vue de la sûreté d'exploitation, dans la limite du respect des exigences spécifiées aux colis présentées dans les spécifications d'acceptation des colis (5).

Pour les familles de colis futures, des évolutions de conditionnement allant au-delà des spécifications d'acceptation des colis ne sont pas pour autant rédhibitoires. Elles peuvent être de différents niveaux à savoir :

- rester dans le domaine de sûreté : dans ce cas, une dérogation aux spécifications d'acceptation des colis ou une évolution de ces dernières est à instruire conformément aux processus définis au volume 6 du présent rapport ;
- sortir du domaine de sûreté : dans ce cas, outre déroger aux spécifications, ces évolutions de conditionnement nécessitent une étude dédiée correspondant à une boucle spécifique entre conception et sûreté pour garantir le stockage sûr de ces colis ; à l'issue si les conclusions de cette étude sont favorables et validées par les autorités requises (cf. Les processus définis au volume 6 du présent rapport), la prise en charge des colis sur l'INB peut être autorisée après mise à jour du référentiel de sûreté.

Ces deux types d'évolutions sont à traiter *via* le processus de gestion des modifications présenté au volume 6 du présent rapport.

3.2.2 La flexibilité face à des évolutions de livraison des colis

Les deux aspects associés aux évolutions de livraison des colis sont présentés au chapitre 2.2 du présent volume. Les évolutions dans l'ordonnancement du stockage des colis et la cadence de stockage auraient un impact limité sur la démonstration de sûreté présentée au volume 9 du présent rapport. Seuls certains aspects de la démonstration sont susceptibles d'être affectés tels que les bilans dosimétriques prévisionnels établis dans le cadre des chroniques de livraison telles que retenu à ce stade.

Par ailleurs, les évolutions de chroniques restent acceptables compte tenu du respect des exigences d'exploitation retenues dans la démonstration de sûreté en exploitation. L'analyse de la conformité des évolutions de chronique vis-à-vis de ces exigences est à traiter via le processus de gestion des modifications présenté au volume 6 du présent rapport.

3.2.3 La flexibilité face à des changements de modes de stockage des colis

Pour les colis HA, la démonstration de sûreté en exploitation couvre un mode de stockage unique de colis primaire en conteneur de stockage.

Pour les colis MA-VL la démonstration de sûreté en exploitation présentée au volume 9 du présent rapport, prend en compte soit deux modes de stockage pour un même colis primaire, soit un seul mode de stockage direct, soit un seul mode de stockage en conteneur.

En lien avec la démonstration de sûreté, des spécifications d'acceptation des colis sont définies selon le stockage des colis primaires MA-VL après mise en conteneur ou panier au préalable ou directement dans les alvéoles de stockage (5).

La modification de la solution de stockage de colis de déchets est ainsi possible dans la mesure du respect des critères applicables à la solution de stockage retenue.

3.2.4 La flexibilité face à une fluctuation du nombre de colis et d'alvéoles

Concernant les alvéoles HA, eu égard à un stockage dans plusieurs décennies, l'évolution éventuelle du nombre de colis à stocker, et du nombre d'alvéoles associés, sera pris dans le cadre des études à mettre en œuvre dans le cadre du développement progressif de l'INB, bien que, vis-à-vis de la sûreté en exploitation, aucun point rédhibitoire ne tend à être relevé.

Pour les alvéoles MA-VL, des évolutions de nombre de colis de déchets MA-VL peuvent conduire à revoir les aménagements internes des alvéoles de stockage MA-VL et, le cas échéant, le nombre d'alvéoles de stockage. La prise en compte de nouveaux aménagements internes est acceptable vis-à-vis de la sûreté d'exploitation dans la limite du respect de certains paramètres à garantir.

Ces paramètres, liés au respect des fonctions de protection, peuvent être le maintien d'un débit de ventilation suffisant autour des colis de déchets pour permettre l'évacuation des gaz de radiolyse, la maîtrise des niveaux de contamination dans la partie utile de l'alvéole de stockage MA-VL voire, le cas échéant, la maîtrise des températures au niveau du génie civil ou du colis de déchets. Ces évolutions feront l'objet d'un traitement dans le respect du processus de modification présenté dans le volume 6 du présent rapport.

Par ailleurs, une augmentation du nombre d'alvéoles de stockage est acceptable dans la mesure où les différents paramètres retenus pour la maîtrise de la sûreté d'exploitation sont respectés.

Cette éventualité, pour les alvéoles de stockage MA-VL, implique par exemple une vérification de la cohérence des débits de ventilation nécessaires pour la maîtrise de la sûreté d'exploitation. Bien qu'une étude au cas par cas doive être réalisée le moment venu afin d'évaluer plus finement l'ensemble des effets d'une augmentation du nombre d'alvéole, la ventilation nucléaire souterraine offre des marges raisonnables dans sa conception afin de permettre une augmentation des débits de ventilation sans remettre en cause la démonstration de sûreté d'exploitation.

Ainsi, compte tenu d'une analyse des paramètres clés de la sûreté d'exploitation vis-à-vis des évolutions des colis de déchets et des marges actuelles de conception, l'INB est flexible aux évolutions du nombre d'alvéoles de stockage MA-VL dans le respect de la démonstration de sûreté présentée dans le volume 9 du présent rapport.

Ces évolutions feront l'objet d'un traitement dans le respect du processus de modification présenté dans le volume 6 du présent rapport à partir du moment où la configuration en termes de nombre d'alvéoles est notablement différente de celle présentée dans le volume 5 du présent rapport.

3.2.5 La flexibilité face à des changements de stratégie en matière de fermeture du stockage

La flexibilité vis-à-vis des évolutions de stratégie de fermeture du stockage est présentée au chapitre 2.5 du présent volume.

Les colis de déchets, les conteneurs et les infrastructures souterraines sont dimensionnés pour que le calendrier d'obturation des alvéoles et de fermeture des quartiers puisse être retardé ou avancé, sans préjudice pour la sûreté.

Par ailleurs, la démonstration de sûreté en exploitation, qui intègre les risques de coactivité entre les activités nucléaires (exploitation et mise en stockage des colis) et les travaux de réalisation des ouvrages de fermeture, est un des critères retenus pour le choix futur du scénario de fermeture. Les générations futures pourront ainsi adapter les opérations de fermeture à leurs contraintes (vitesse de remplissage plus ou moins rapide…) et aux décisions de politiques nationales relatives à l'inventaire (quartiers plus ou moins grands…). Elles pourront avancer progressivement vers une sûreté plus passive ou au contraire choisir de préserver une récupérabilité plus aisée, en particulier si des pistes alternatives au stockage réalistes venaient un jour à se concrétiser.

Synthèse

Vis-à-vis de la sûreté en exploitation, l'installation de stockage Cigéo présente, une flexibilité :

- aux évolutions du conditionnement des colis. Ces évolutions se traduisent principalement par d'éventuels changements d'inventaire radiologique, de géométrie ou de masse de colis par rapport aux données présentées dans le volume 3 du présent rapport. Ces évolutions sont encadrées par la pièce 19 « Version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis » (5). Ces évolutions sont à traiter *via* le processus de gestion des modifications présenté au volume 6 du présent rapport ;
- à des évolutions de livraison des colis. Ces évolutions des chroniques impliquent une analyse d'impact sur les hypothèses émises pour la démonstration de la sûreté en exploitation et les exigences d'exploitation retenues. Cette analyse s'inscrit dans le cadre du processus de gestion des modifications présenté au volume 6 du présent rapport ;
- à des changements de mode de stockage. Cette flexibilité s'applique aux colis de déchets MA-VL. Un changement du mode de stockage des colis tel que prévu dans la démonstration de sûreté est possible compte tenu du respect des critères spécifiques applicables à la solution de stockage retenue présentés dans la pièce 19 « Version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis » (5) qui pourront évoluer elles aussi ;
- à une fluctuation du nombre de colis et d'alvéoles de stockage. Les évolutions liées au nombre de colis de stockage ou aux alvéoles HA sont intégrées au titre des études liées au développement progressif de l'INB. Les évolutions associées au nombre de colis de stockage ou alvéoles de stockage MA-VL sont acceptables à condition du respect des paramètres retenus pour la démonstration de sûreté présentée dans le volume 9 du présent rapport. Toute évolution est à traiter *via* le processus de gestion des modifications présenté au volume 6 du présent rapport ;
- à des changements de stratégie en matière de fermeture. La démonstration de sûreté intègre la possibilité d'intégrer des changements vis-à-vis de la stratégie de fermeture, celle-ci n'étant pas figée (cf. Pièce 13 « Plan, de démantèlement, de fermeture et surveillance » (1)) Les aspects liés à la coactivité entre activités nucléaires et activités liées aux travaux de réalisation des ouvrages de fermeture sont d'ores et déjà intégrés dans la démonstration de sûreté présentée au volume 9 du présent rapport. Cette flexibilité n'induit pas d'incidence sur la démonstration de sûreté en exploitation.

4

Le cas spécifique de la flexibilité vis-à-vis des voies de gestion des déchets bitumés

4.1 Le rappel du contexte 38
4.2 La description des deux voies de gestion des déchets bitumés envisagées 41
4.3 Les dispositions de conception pour les deux voies de gestion des déchets bitumés envisagées 44
4.4 L'analyse de la flexibilité vis-à-vis des deux voies de gestion envisagées vis-à-vis de la sûreté 55

4.1 Le rappel du contexte

En 2016, l'Andra a soumis à l'Autorité de sûreté nucléaire le « Dossier d'options de sûreté » (DOS) (3, 4). Suite à une phase d'instruction technique mettant en jeu les expertises de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (10, 11), appui technique de l'ASN, et des groupes permanents d'experts pour les déchets et pour les laboratoires et les usines (GP) (12), l'ASN a émis un avis et adressé une lettre de suite en janvier 2018 (13, 14). Dans cet avis, elle estime que :

- « *le projet Cigéo a atteint dans son ensemble une maturité technologique satisfaisante au stade du dossier d'options de sûreté* » ;
- « *le dossier d'options de sûreté est documenté et étayé et constitue une avancée significative par rapport aux précédents dossiers ayant fait l'objet d'avis de l'ASN* ».

Toutefois, concernant le stockage des colis de déchets bitumés, elle précise que *« les options de conception retenues à ce stade par l'Andra ne permettent ni de prévenir ni de limiter les risques à un niveau acceptable en cas de réaction exothermique à l'intérieur d'un colis de déchets bitumés »*. De plus, *« La recherche de la neutralisation de la réactivité chimique des colis de déchets bitumés doit être privilégiée. En parallèle, des études visant à modifier la conception pour exclure le risque d'emballement de réactions exothermiques doivent être conduites. En tout état de cause, la caractérisation dans les meilleurs délais de ces colis de déchets bitumés par leurs producteurs est un préalable indispensable. »*.

Dans sa lettre de 2018, l'ASN demande à l'Andra dans le cas où elle envisage *« le stockage en l'état de tout ou partie des colis de déchets bitumés de présenter, dans le dossier de demande d'autorisation de création, des modifications de conception pour exclure le risque d'emballement des réactions exothermiques, concernant notamment :*

- *les dispositions de surveillance permettant de détecter au plus tôt une montée progressive de la température ;*
- *les dispositions prévues en cas d'incendie pour empêcher des réactions exothermiques des colis de déchets bitumés et la propagation à un ou d'autres colis ;*
- *les mesures de limitation des conséquences vis-à-vis de la dissémination de matière radioactive à la suite d'une dégradation thermique des colis. ».*

Par ailleurs, au vu des enjeux importants, tant pour la sûreté que pour le développement du projet global Cigéo, à la demande conjointe du ministre de la transition écologique et solidaire et de l'ASN (17), une revue externe par des experts français et internationaux dans le domaine de la gestion des déchets bitumés a été lancée en septembre 2018 et s'est fixé trois objectifs :

- l'évaluation des connaissances scientifiques relatives à la caractérisation et au comportement des déchets bitumés ;
- l'évaluation de la pertinence des recherches en cours sur la neutralisation de la réactivité chimique des déchets bitumés ;
- l'évaluation de la pertinence des études conduites par l'Andra visant à modifier la conception de l'INB pour exclure le risque d'emballement de réactions exothermiques.

Les experts de la revue ont analysé un ensemble de documents de l'Andra, de l'IRSN et du CEA et ont mené des audits pour aboutir à un rapport final de revue publié en juin 2019 (15). La synthèse est reprise en annexe 1 du présent volume.

Il est à noter que la revue estime que les deux voies de gestion des déchets bitumés, que sont la neutralisation et le stockage en l'état, sont possibles. En effet, dans l'hypothèse où le stockage en l'état des colis de déchets bitumés dans l'INB Cigéo est retenu (15), *« on ne peut exclure que quelques-uns de ces fûts ne puissent pas satisfaire aux critères d'acceptation qui seront définis et doivent donc faire l'objet d'un traitement particulier »*.

De plus, concernant les études conduites par l'Andra en vue d'améliorer la conception de l'INB pour exclure le risque d'emballement de réactions exothermiques, le groupe de revue écrit que « *bien que toutes les études ne soient pas terminées, le groupe a la conviction que des dispositions techniques permettant un stockage des déchets bitumés dans Cigéo dans des conditions de sûreté acceptables peuvent être définies sur la base des techniques disponibles aujourd'hui en ingénierie…* » et que « *les études conduites par l'Andra sont à cet égard pertinentes et devraient permettre d'arriver à court terme à une conception dont la sûreté pourrait être démontrée de façon convaincante* ».

En parallèle de cette revue, des travaux conduits de manière quadripartite entre l'Andra, le CEA, Orano et EDF ont porté, dans un premier temps, sur les différents procédés de traitement et, dans un second temps, sur l'industrialisation de ces procédés correspondant à des grandes options technologiques différentes. Ceci est développé spécifiquement au chapitre 4.2.2 du présent volume.

Par ailleurs, dans le cadre du PNGMDR 2016-2018 (16), l'ASN et l'Autorité de sûreté nucléaire défense (ASND) ont instruit conjointement les rapports relatifs au comportement des enrobés bitumés en stockage, et ont formulé en mai 2019 des demandes complémentaires en vue de la demande d'autorisation de création de l'INB.

En réponse à ces avis et aux conclusions de la revue d'experts, d'une part l'Andra a soumis en juillet 2019 à l'ASN la démarche retenue sur la base d'hypothèses enveloppes pour la conception et la démonstration de sûreté qui a également fait l'objet d'une instruction par l'IRSN saisi par l'ASN.

D'autre part, EDF, le CEA, ORANO et l'Andra ont mis en place un nouveau programme quadripartite dit « programme Babylone » visant à apporter les éléments relevant de la R&D pour répondre au besoin de consolidation de la connaissance du comportement des bitumes en vue de leur stockage et afin de permettre de concevoir les conditions de stockage (installations et règles d'exploitation) adaptées.

L'ASN a donc complété ses demandes à la suite de cette revue et des éléments fournis dans le cadre du PNGMDR 2016-2018 sur la gestion des déchets bitumés en adressant à l'Andra les avis en 2020 et 2021 (17, 18) relatifs aux études inscrites dans le PNGMDR 2016-2018 et axés sur les comportements physico-chimique et thermique des colis de déchets bitumés en stockage.

Elles portent essentiellement sur :

- les dispositions de conception des alvéoles de stockage dédiés aux colis de déchets bitumés en l'état, ainsi que la gestion d'un colis en situation post-accidentelle ;

  « [Andra-art.46b-D1] Je vous demande de préciser les modalités envisagées pour la gestion des colis qui seraient retirés de leur alvéole de stockage et les évolutions de conception nécessaires. » ;

- la résistance du conteneur de stockage en cas d'emballement d'une réaction exothermique ;

  « [Andra-art.46b-D2] Je vous demande de présenter une réévaluation de la surpression maximale générée par un emballement d'une réaction exothermique dans un surconteneur de colis de déchets bitumés, tenant compte de l'ensemble des phénomènes à l'origine de cette surpression ;

  [Andra-art.46b-D3] En complément de la demande [Andra-Art-46-1], je vous demande de considérer, dans votre scénario extrême, les résultats issus de la réévaluation de surpression mentionnée à la demande [Andra-art.46b-D2] et de présenter les conséquences possibles de cette surpression liée à un emballement d'une réaction exothermique dans le surconteneur, sur l'état du colis et de son environnement immédiat. » ;

- l'évaluation des conséquences radiologiques à la suite d'un emballement.

  « [Andra-art.46b-D4] Je vous demande de réexaminer et, le cas échéant, de réviser votre évaluation des conséquences radiologiques liées à l'incendie d'un surconteneur de colis de déchets bitumés, en précisant les hypothèses retenues. Vous présenterez, le cas échéant, les dispositions techniques et organisationnelles complémentaires qui pourraient être mises en œuvre pour limiter la dissémination de substances radioactives, conformément au principe de défense en profondeur, et évaluerez les conséquences radiologiques associées. »

L'ASN dans son avis du 1er décembre 2020 (19), estime notamment que pour les colis de déchets bitumés dont la sûreté en stockage ne pourrait être démontrée, des travaux complémentaires devront être entrepris. L'ASN ajoute qu'« *à cet égard, les études concernant leur éventuel traitement préalable doivent être poursuivies avec pour objectif de permettre leur stockage dans des conditions sûres.*

Au regard des enjeux de sûreté, il est nécessaire d'explorer, en tenant compte du nombre de colis concernés, toutes les voies de traitement envisageables. ».

» NOTE IMPORTANTE

Sur la base des différents avis et recommandations (revue internationale par des experts et avis de 2019 à 2021 du PNGMDR 2016-2018) parus depuis l'instruction du dossier 2015 et plus particulièrement l'avis ASN de 2018 (13), l'Andra retient deux voies de gestion pour le stockage des déchets bitumés sans préjuger d'une voie préférentiellement à une autre :

- un stockage en l'état de colis de déchets bitumés (sans traitement préalable) mis dans des conteneurs en béton « renforcés », vis-à-vis de l'incendie, avant leur transfert et leur mise en stockage dans des alvéoles dédiés (cf. Chapitres 4.3.1 et 4.3.2.1 du présent volume) ;
- un stockage de colis de déchets issus d'un traitement visant la neutralisation des déchets bitumés (cf. Chapitre 4.3.1 du présent volume).

En lien avec le développement progressif de l'installation souterraine et dans une démarche prudente, **l'Andra ne prévoit pas que soient stockés ces colis dans les premiers alvéoles mis en service.**

Ainsi, l'Andra a intégré dans ses études de conception et de sûreté associées les deux voies de gestion des déchets bitumés, au titre de la flexibilité pour pouvoir accueillir les colis de déchets quelle(s) que soi(en)t la ou les voies retenues à terme en identifiant les dispositions conservatoires le cas échéant à mettre en place dès la construction initiale.

4.2 La description des deux voies de gestion des déchets bitumés envisagées

4.2.1 Le stockage des colis de déchets bitumés en l'état

Les caractéristiques des familles de colis de déchets bitumés (cf. Volume 3 du présent rapport) sont rappelées dans le tableau 4-1 ci-après.

Tableau 4-1 Inventaire en colis de déchets bitumés

Identifiant familles	Intitulé famille	Conteneur Primaire	Nombre de colis	État de production
CEA-1000	Fûts en acier inoxydable contenant des fûts en acier inoxydable d'enrobés bitumineux produits sous spécification d'assurance qualité (à partir d'octobre 1996).	EIP	2 700	En cours
CEA-1010	Fûts en acier inoxydable contenant des fûts en acier non allié d'enrobés bitumineux produits sous spécification d'assurance qualité (de 1995 à 1996).	EIP	1 709	Terminée
CEA-1020	Fûts en acier inoxydable contenant des fûts en acier non allié d'enrobés bitumineux produits avant 1995.	EIP	24 422	Terminée
COG-020	Fûts bitumes STE3 produits suivant la spécification 300 AQ 027.	Fût acier	13 100	En cours
COG-420	Fûts enrobés bitumineux STE2 (reprise partielle silo 550-14).	Fût acier	340	Terminée

Dans le cadre de la conception de l'installation nucléaire de base Cigéo, le stockage de ces colis est considéré en conteneurs de stockage renforcé vis-à-vis de l'incendie dans des alvéoles dédiés dont la conception est elle-même également renforcée vis-à-vis du risque incendie et situés dans le quartier de stockage MA-VL.

4.2.2 Le stockage des colis issus d'un traitement des fûts de déchets bitumés

4.2.2.1 Les filières de traitement envisagées

Au titre de l'article 48 de l'arrêté du 23 février 2017 pris pour application du PNGMDR 2016-2018 (16), il a été demandé :

- au CEA de présenter l'avancée des travaux sur des scénarios prospectifs de traitement et conditionnement d'environ 72 000 colis d'enrobés de boues bitumées, considérés comme relevant des filières de gestion FA-VL et MA-VL, actuellement entreposés sur les sites du CEA-Marcoule et d'Orano La Hague ;
- au CEA, Orano, EDF et l'Andra de remettre un rapport d'évaluation technique, économique et de sûreté comparant les différents modes de traitement et de conditionnement envisagés pour les déchets bitumés.

Ces demandes ont fait l'objet des rapports (20, 21).

Les travaux décrits dans la note relative à l'état d'avancement des travaux sur des scénarios prospectifs de traitement et conditionnement des déchets d'enrobés bitumineux en réponse à l'article 48.1 de l'arrêté du 23 février 2017 pris pour application du PNGMDR 2016-2018 (16) sont le résultat de groupes de travail pilotés par le CEA et rassemblant des experts de l'Andra, du CEA, d'Orano et d'EDF (20). Ils ont porté, dans un premier temps, sur l'identification de différents procédés de traitement potentiels et, dans un second temps, sur une analyse de type multicritères de ces procédés. Différentes briques technologiques ont été identifiées et assemblées sous forme de filière de traitement, chacune visant soit à rendre le déchet compatible avec l'opération de traitement (pré-traitement), soit à neutraliser la réactivité du déchet (bitume et/ou sels) (traitement), soit à conditionner les résidus pour une mise en stockage finale à définir (post-traitement). Les réflexions ont porté sur le traitement de l'ensemble des déchets bitumés de La Hague et Marcoule.

À l'issue de ces travaux, trois filières de traitement des déchets bitumés, toutes mettant en œuvre un procédé de type thermique, ont été identifiées comme présentant le meilleur potentiel et ont fait l'objet d'études d'ingénierie de niveau préfaisabilité pour en évaluer la pertinence technico-économique. Elles sont décrites dans la note répondant à l'article 48.2 de l'arrêté du 23 février 2017 pris pour application du PNGMDR 2016-2018 présentant une évaluation comparée des différents modes de gestion envisagés pour les déchets bitumés (CEA, EDF, Orano, Andra) (21). Ces filières de traitement résumées en annexe 2 du présent volume sont :

- filière 1 : « incinération/vitrification » ;
- filière 2 : « combustion classique suivie d'un conditionnement par cimentation ou vitrification » ;
- filière 3 : « vaporeformage suivi d'un conditionnement par cimentation ».

Dans tous les cas, les spécificités du bitume ont conduit à identifier les principales incertitudes techniques à lever. Les principaux axes d'un programme de R&D, d'une durée estimée supérieure à 15 ans, ont été identifiés (cf. Annexe 2 du présent volume).

4.2.2.2 Les hypothèses relatives au conditionnement des déchets bitumés neutralisés

Pour mener à bien les études de conception de l'INB, l'hypothèse retenue de traitement par vitrification, conduit à la production de colis MA-VL, concentrant l'activité des déchets bitumés faisant l'objet du traitement dans un volume plus faible.

Les colis de déchets vitrifiés produits peuvent être soit des conteneurs standard de déchets (CSD), soit des colis de diamètre plus important, permettant d'optimiser à la fois la capacité du procédé de traitement et le nombre de colis. Le cas échéant ils pourraient être stockés en espace intercalaire dans la zone de stockage HA comme c'est le cas pour d'autres colis MA-VL vitrifiés.

Pour les études de conception, la production de CSD a été privilégiée car elle permet un conditionnement du même type que ceux déjà présents dans l'inventaire de référence. Cela correspond à la filière 2 (combustion classique suivie d'un conditionnement par vitrification).

Ce choix en termes de nature de bloc de déchets et d'enveloppe est analogue à la famille COG—470[8]. Comme pour tout colis dont le conditionnement est à l'état de recherche, le principe retenu est que le colis primaire contenant les déchets bitumés neutralisés respecte les spécifications d'acceptation des colis de l'INB Cigéo (5).

En termes d'inventaire physique, un facteur de réduction du volume de déchets égal à deux comparativement au volume de déchets bitumés est retenu. Cette hypothèse conduit à un nombre de CSD de l'ordre de 25 000 colis MA-VL issus du traitement des déchets bitumés MA-VL (cf. Tableau 4-1).

[8] Cette famille relève de la catégorie MA-VL et correspond à des colis standard contenant des effluents de moyenne activité vitrifiée.

En termes d'inventaires radiologique et en substances toxiques chimiques, l'hypothèse conservative de traitement retenue ne modifie pas l'ordre de grandeur de l'inventaire global de l'ensemble des colis de déchets bitumés. En lien avec l'hypothèse de réduction de volume exposée précédemment, cela conduit à produire des colis de déchets bitumés neutralisés plus « chargés » en déchets (activités massiques en radionucléides et concentrations en toxiques dus aux déchets supérieurs) que les colis de déchets bitumés en l'état.

À ce stade, le stockage en alvéoles MA-VL de colis préalablement mis en conteneurs de stockage a été privilégié pour les études de conception et de sûreté, de sorte à faciliter la comparaison avec le stockage des enrobés bitumés en l'état.

4.2.3 Synthèse

Le tableau ci-après synthétise les dispositions de conception retenues pour chacune des deux voies.

Tableau 4-2 Les dispositions de conception associées aux deux modes de stockage des colis de déchets bitumés

	Stockage de colis de déchets bitumés mis en conteneur « renforcé » vis-à-vis de l'incendie	Stockage de colis de déchets issus du traitement des déchets bitumés
Mode de stockage retenu	Mise en place des colis de déchets bitumés dans des conteneurs de stockage « renforcés » vis-à-vis de l'incendie (type CS4) Et stockage dans des alvéoles MA-VL dédiés uniquement à ces colis[9]	Colis de déchets bitumés issus du traitement des déchets bitumés mis en conteneurs de stockage en béton (type CS2) Et dans des alvéoles MA-VL « classiques »
Inventaire	De l'ordre de 42 300 colis primaires (démarrage de la livraison à l'horizon 2050) : • environ 28 900 colis EIP Marcoule ; • environ 13 440 colis de La Hague	≈ 25 000 colis primaires de type CSD
Nombre d'alvéoles	8 alvéoles MA-VL	Entre un et quatre alvéoles MA-VL

Ces données couvrent l'ensemble des scénarios possibles pour les colis de déchets bitumés de l'inventaire de référence. Le traitement des déchets bitumés ne pourra concerner qu'une partie de cet inventaire.

[9] La conception est elle-même également renforcée vis-à-vis du risque incendie

4.3 Les dispositions de conception pour les deux voies de gestion des déchets bitumés envisagées

4.3.1 Le stockage des colis issus du traitement des fûts de déchets bitumés

Pour les colis issus du traitement et définis préalablement au chapitre 4.2.2.2 du présent volume, deux options de stockage éventuellement combinables sont envisagées (cf. Chapitre 4.4 du présent volume) :

- un stockage dans les espaces intercalaires vides des alvéoles du quartier de stockage HA pour les colis vitrifiés le stockage de colis de type CSD avec mise en conteneur de stockage pourrait être réalisé sans construction d'alvéole supplémentaire ;
- un stockage en alvéoles MA-VL : les colis primaires constitués sont placés en conteneur de stockage ou font l'objet d'un stockage direct qui selon le conditionnement retenu, conduit à la nécessité d'un à quatre alvéoles MA-VL.

Quelle que soit l'option retenue, comparativement au quartier de stockage MA-VL avec des colis de déchets bitumés stockés dans des conteneurs renforcés vis-à-vis de l'incendie, le quartier de stockage MA-VL résultant comprend un nombre plus réduit d'alvéoles : entre 1 et 4 alvéoles, au lieu de 8.

Les dispositions de conception, d'organisation, d'exploitation et de sûreté associées pour le stockage des colis issus du traitement des fûts de déchets bitumés sont a priori couvertes par celles présentées dans les volumes dédiés précédents de la présente version préliminaire du rapport de sûreté compte tenu des analogies entre les colis à l'issue du traitement et ceux considérés dans l'inventaire de référence. Comme pour tout nouveau conditionnement, celui-ci-fera l'objet d'un avis sur conditionnement (cf. Volume 3 du présent rapport).

» NOTE IMPORTANTE

Il est à noter que, même si les études relatives aux traitements des fûts de déchets bitumés n'ont pas identifié de point rédhibitoire (20, 21), l'ampleur des besoins en R&D et qualification identifiés et le niveau de maturité des procédés envisagés ne permettent pas d'envisager une mise en service d'une installation industrielle de traitement avant 2045. En ce sens, les hypothèses d'ordonnancement actuelles repoussent l'arrivée du premier colis sur l'INB au-delà de 2050 (cf. Pièce 20 « Plan de développement de l'installation de stockage Cigéo » (22)).

4.3.2 Le stockage des colis de déchets bitumés en l'état

NOTE IMPORTANTE

Le stockage des déchets bitumés en l'état après mise en conteneur renforcé vis-à-vis de l'incendie est retenu à ce stade pour le dimensionnement de l'INB et plus particulièrement du bâtiment nucléaire de surface EP1 et des équipements et ouvrages communs à tous les colis. Ce choix permet de couvrir les risques vis-à-vis notamment de l'incendie qui de fait sont écartés en cas de traitement des déchets bitumés et ainsi permet de couvrir les aléas en termes de décision ultérieure.

Concernant l'alvéole de stockage, sa conception est liée au choix retenu (pour rappel les colis de déchets bitumés ne sont pas co-stockés avec d'autres colis MA-VL et ne sont pas stockés dans la première tranche (T1) pendant la Phipil). Ainsi le présent chapitre décrit la conception de l'alvéole de stockage dédié aux colis de déchets bitumés en l'état en accord avec la démarche retenue par l'Andra sur la base d'hypothèses enveloppes et transmise à l'ASN en juillet 2019[10] (18). Les progrès à venir sur la connaissance du comportement des enrobés bitumineux (programme Babylone) seront susceptibles de faire évoluer ces hypothèses (cf. Pièce 20 « Plan de développement de l'installation de stockage Cigéo » (22)).

Le stockage des colis de déchets bitumés dans l'INB est détaillé dans le « Dossier de justification de la conception des alvéoles dédiés au stockage des colis de déchets bitumés mis en conteneur renforcé » vis-à-vis de l'incendie (24).

Les dispositions en matière de conception spécifique au stockage des colis de déchets bitumés en l'état sont :

- la mise en conteneur béton renforcé vis-à-vis de l'incendie ;
- le pont polyvalent qui en plus de sa fonction principale de manutention (comprenant la possibilité de déplacer des colis de stockage dans la partie utile de l'alvéole sans extraire tous les colis de la nappe), permet de surveiller les colis de stockage (caméra, caméra thermique, endoscope) lors de son utilisation en alvéole et de les refroidir par aspersion d'eau le cas échéant ;
- l'aménagement particulier de la partie utile de l'alvéole de stockage ;
- le réseau de surveillance de la température ;
- le robot d'intervention qui dispose de moyens de surveillance (caméra et caméra thermique) et d'intervention permettant d'éteindre un incendie sur le pont polyvalent ou de refroidir les colis de stockage par aspersion d'eau ;
- une zone d'isolement de colis de stockage positionnée en tête de la partie utile de l'alvéole de stockage ; elle est équipée d'un système d'aspersion fixe.

Pour l'ensemble des autres composants constituant l'alvéole de stockage MA-VL ou étant en interface, ceux-ci sont identiques aux autres alvéoles de stockage MA-VL et dont la description est présentée dans le chapitre 6.2 du volume 5 du présent rapport.

[10] Selon la note « Stockage en l'état des fûts de déchets bitumés dans Cigéo : Maîtrise des risques et principes d'évolution et de conception » (23).

4.3.2.1 Le conteneur de stockage des colis de déchets bitumés

Les conteneurs de stockage pour les colis de déchets bitumés sont de deux types en fonction de la géométrie des colis primaires (colis de 380 L pour les enrobés produits par le CEA ; colis de 220 L pour les enrobés produits par Orano). Seul l'aménagement interne des conteneurs varie, pouvant contenir 4 colis de 380 L ou 5 colis de 220 L.

Compte tenu de leur géométrie, les colis produits par le CEA sont destinés à être stockés en CS4.1 (cf. Figure 4-1).

Les colis produits par Orano peuvent être stockés en CS4.2 (cf. Figure 4-2).

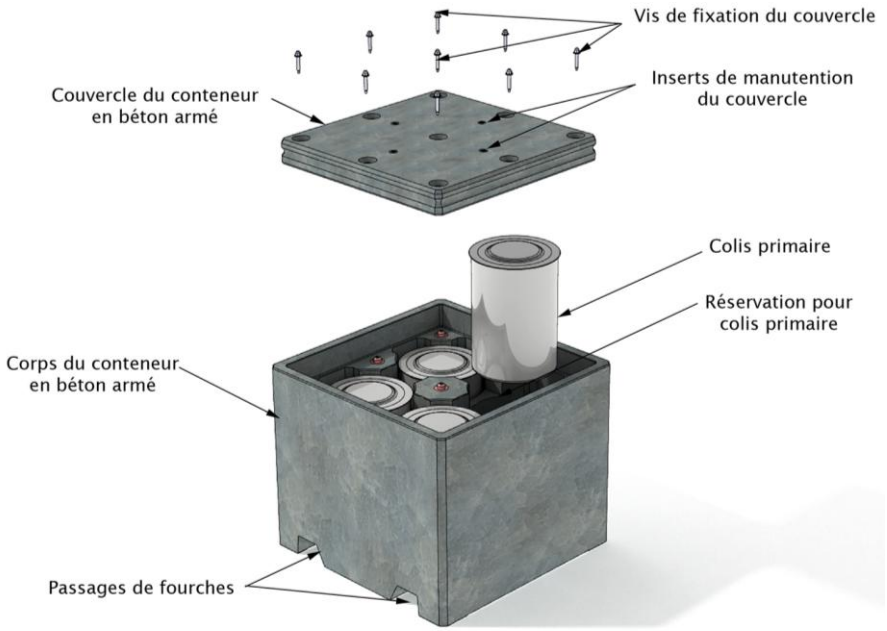


Figure 4-1 *Schéma de principe d'un conteneur de stockage renforcé contenant des déchets bitumés en l'état (CS4.1)*

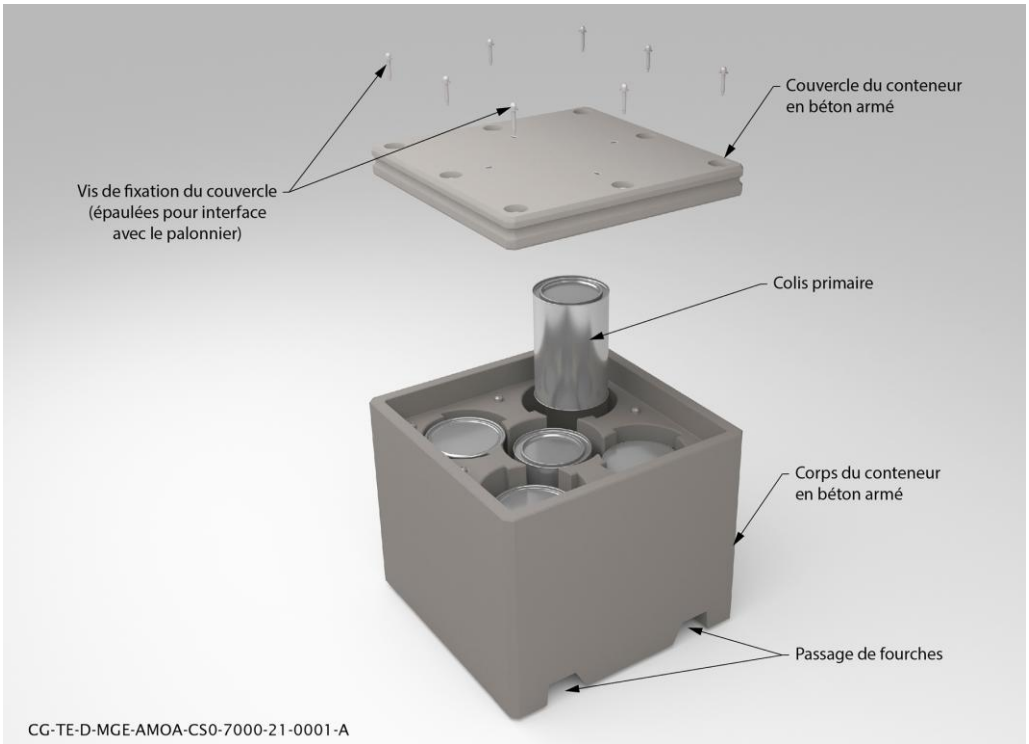


Figure 4-2 *Schéma de principe d'un colis de stockage de déchets bitumés en l'état à cinq logements (CS4.2)*

Les conteneurs de stockage CS4.1 et CS4.2 sont des conteneurs de forme parallélépipédique, constitués d'un corps et d'un couvercle vissé. Ils présentent des réservations ajustées à la géométrie des colis primaires, pour limiter le taux de vide interne.

Afin d'exclure le risque d'emballement de réactions exothermiques dans les colis de déchets bitumés en conteneur de stockage, une attention particulière est portée à la protection thermique des déchets bitumés. Cette protection est assurée par le conteneur de stockage en béton renforcé de fibres polypropylènes et d'épaisseur de 20 cm en tout point (épaisseur plus importante que tout autre conteneur de stockage MA-VL).

Ces colis de stockage sont manutentionnés à l'aide du pont polyvalent, au moyen de quatre vis entourées d'un cône « avaloir » et se situant sur la face supérieure du colis pour permettre le centrage du palonnier lors de son approche avant le verrouillage mécanique du palonnier sur les vis.

4.3.2.2 L'aménagement de la partie utile de l'alvéole de stockage de colis de déchets bitumés stockés en l'état

L'aménagement de la partie utile de l'alvéole de stockage est limité à deux nappes de colis de stockage de déchets bitumés (cf. Figure 4-3).

Cet espace permet la circulation du pont de manutention, en toutes circonstances[11].

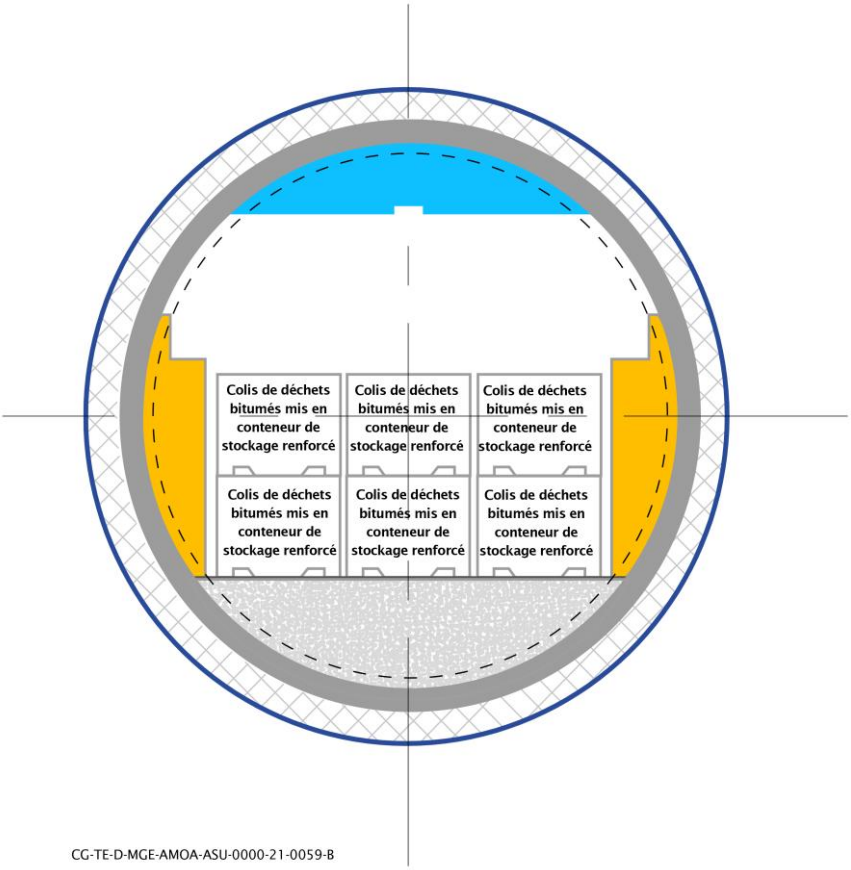


Figure 4-3 *Illustration de la section de l'alvéole dédié au stockage en l'état des colis de déchets bitumés et mis en conteneur renforcé vis-à-vis de l'incendie*

4.3.2.3 Le système de surveillance de l'alvéole de stockage

La capacité à détecter et à localiser spatialement un événement thermique dans la partie utile de l'alvéole est assurée par des fibres optiques placées dans le radier et au niveau de la voûte de l'alvéole de stockage (six lignes de mesure de température : trois au niveau de la voûte et trois dans le radier).

Le système de surveillance est constitué :

- d'un élément sensible, la fibre optique : dopée en fluor pour la résistance aux radiations ;
- d'un interrogateur, l'instrument de mesure associé à son logiciel de traitement du signal ;
- d'un multiplexeur qui comprend plusieurs voies de mesure.

Des éléments constituant la terminaison du système de surveillance par fibre optique sont mis en place en jonction de retour d'air de l'alvéole.

[11] Pour minimiser les vides résiduels après la fermeture, il est envisagé d'ajouter le cas échéant des blocs de remplissage (à ce stade en béton).

Pour effectuer la levée de doute en cas d'alarme, des moyens de détections sont embarqués sur le pont polyvalent (caméras visuelles et infra-rouge, endoscope) ainsi que sur un robot d'intervention (caméras visuelles et infra-rouge) qui peuvent parcourir l'ensemble de l'alvéole.

4.3.2.4 La capacité d'intervention en partie utile de l'alvéole de stockage

En fonction du déroulement d'un éventuel incident et de ses caractéristiques, plusieurs modalités de gestion sont possibles sur la base des dispositifs complémentaires suivants :

- le pont, dit « pont polyvalent », propre aux alvéoles dédiés aux colis de déchets bitumés en l'état, permet de déplacer des colis de stockage dans la partie utile de l'alvéole (cf. Figure 4-4) :
  - ✓ le colis douteux peut être déplacé et isolé dans la zone prévue à cet effet en tête de la partie utile de l'alvéole ou les colis adjacents du colis douteux peuvent être déplacés afin d'isoler *in situ* le colis douteux ;
  - ✓ le pont polyvalent est positionné en attente en cellule de manutention lorsqu'il n'est pas en cours de positionnement d'un colis de stockage dans la partie utile de l'alvéole ;



- la manutention des colis de stockage par le dessus se fait au moyen d'un système de levage par câble (portique + palonnier, cf. Figure 4-5) :
  - ✓ un portique en porte-à-faux sur l'avant du chariot permet de positionner le palonnier au-dessus d'un colis ;
  - ✓ un palonnier qui est constitué d'une plateforme carrée disposant à chaque coin d'un système de verrouillage utilisé pour accrocher le colis.



- le système de verrouillage, inspiré du système commercial « Arteon » ou ancre hémisphérique :
  - ✓ est mis en mouvement par deux vérins électriques (travail/secours) ;
  - ✓ permet le verrouillage mécanique du préhenseur une fois le colis pris en charge par ce dernier à l'aide d'une empreinte sphérique dans le fond de la griffe de préhension (cf. Figure 4-6).

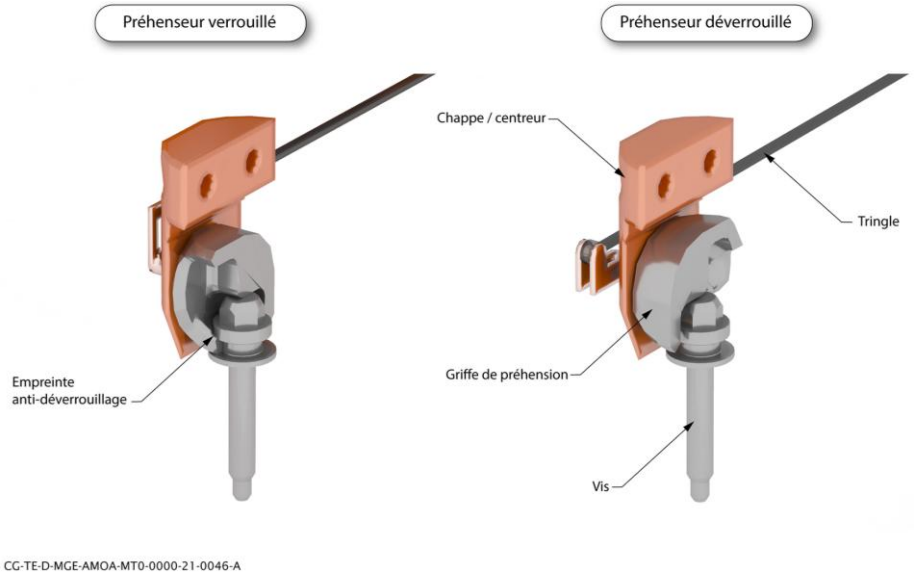


Figure 4-6 *Illustration du système de verrouillage, vis (conteneur) et griffe (palonnier) pour le stockage en l'état de colis de déchets bitumés mis en conteneur de stockage renforcé vis-à-vis de l'incendie*

- le système de levage est constitué de deux treuils et de deux câbles, pour la redondance, ainsi que d'un réseau de poulies indépendant ou dispositif de mouflage (cf. Figure 4-7) :
  - ✓ chaque câble court d'un treuil à l'autre en passant par un train de poulies ;
  - ✓ ce montage permet une sécurité accrue de l'exploitation car il prévient des incidents types rupture de câble ou panne de treuil.

- le système d'extinction d'un incendie surgissant sur le pont et de refroidissement des colis de stockage, composé d'une réserve d'eau embarquée, est également intégré au pont et permet :
  - ✓ soit le déclenchement d'un brouillard d'eau au niveau du pont de manière automatique au moyen d'ampoules fusibles ;
  - ✓ soit l'aspersion sur commande d'un opérateur d'un colis douteux ou d'une zone de plusieurs rangs de colis de stockage.
- le robot d'intervention, positionné en cellule de manutention (cf. Figure 4-8), permet une levée de doute sur le colis de stockage et une aspersion avec de l'eau si besoin.



Ce robot d'intervention est de type monorail, suspendu sous voûte (cf. Figure 4-9) :

- ✓ l'aspersion depuis ce robot est réalisée par une lance motorisée, avec une portée au moins égale à quelques rangs de colis, à la longueur du pont polyvalent plus une marge de sécurité correspondant à l'éloignement du robot ;
- ✓ le robot comporte un système d'éclairage, une caméra vidéo de contrôle, une caméra thermique, une lance incendie orientable, un système d'autoprotection en particulier au niveau des systèmes de traction et de guidage ;
- ✓ il est alimenté en eau par un tuyau déroulé[12] depuis la cellule de manutention, supporté dans le linéaire de l'alvéole par des jeux de galets ;
- ✓ il dispose d'une capacité à délivrer une aspersion pendant une durée non limitée.

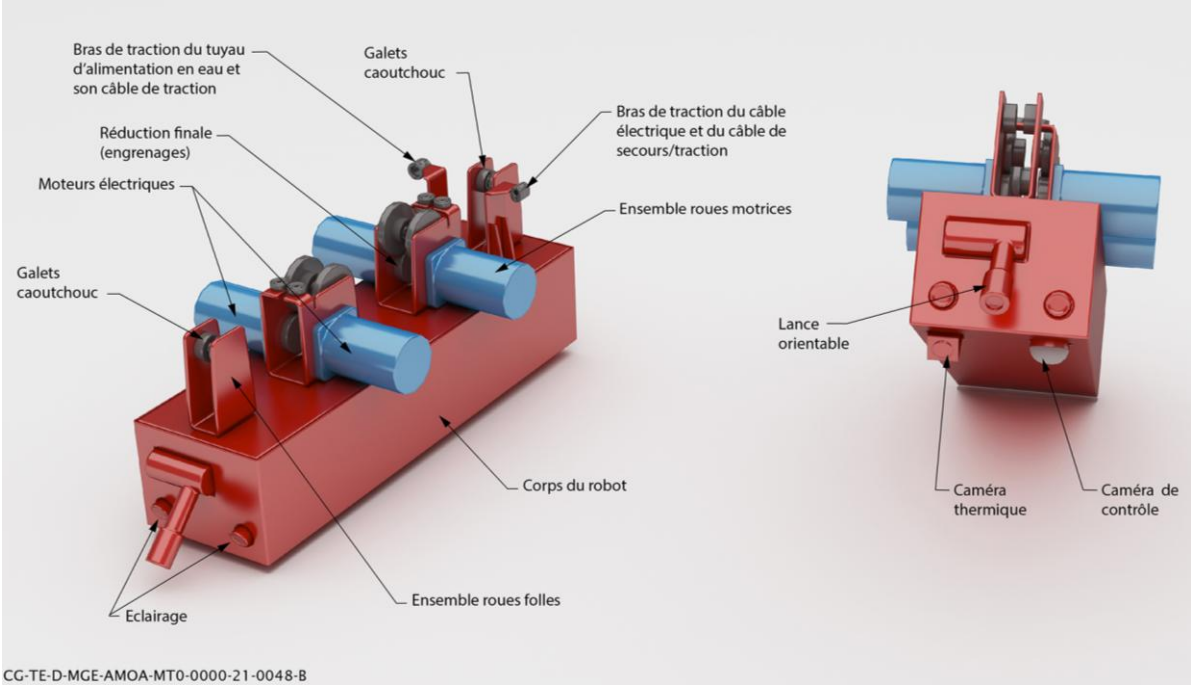


Figure 4-9 Schéma de principe du robot

[12] Le déroulement/enroulement du tuyau est réalisé par un enrouleur motorisé, situé en cellule de manutention, qui est synchronisé avec l'avance/recul du robot d'intervention ; de même l'alimentation en énergie et la liaison contrôle-commande sont réalisées par un ombilical à partir d'un enrouleur également situé en cellule de manutention.

- la zone d'isolement est située en tête de la partie utile de l'alvéole, celle-ci est équipée d'un système d'aspersion fixe pour permettre d'intervenir sur les colis douteux retirés par le « pont polyvalent » (cf. Figure 4-10) :
  - ✓ l'aspersion se fait par le haut à partir de buses raccordées à un réseau passant à l'intérieur des éléments préfabriqués de comblement de la voûte ;
  - ✓ le réseau en acier inoxydable peut être inspecté ;
  - ✓ une vanne d'isolement motorisée est commandée par un opérateur lorsque le colis à refroidir est en place.

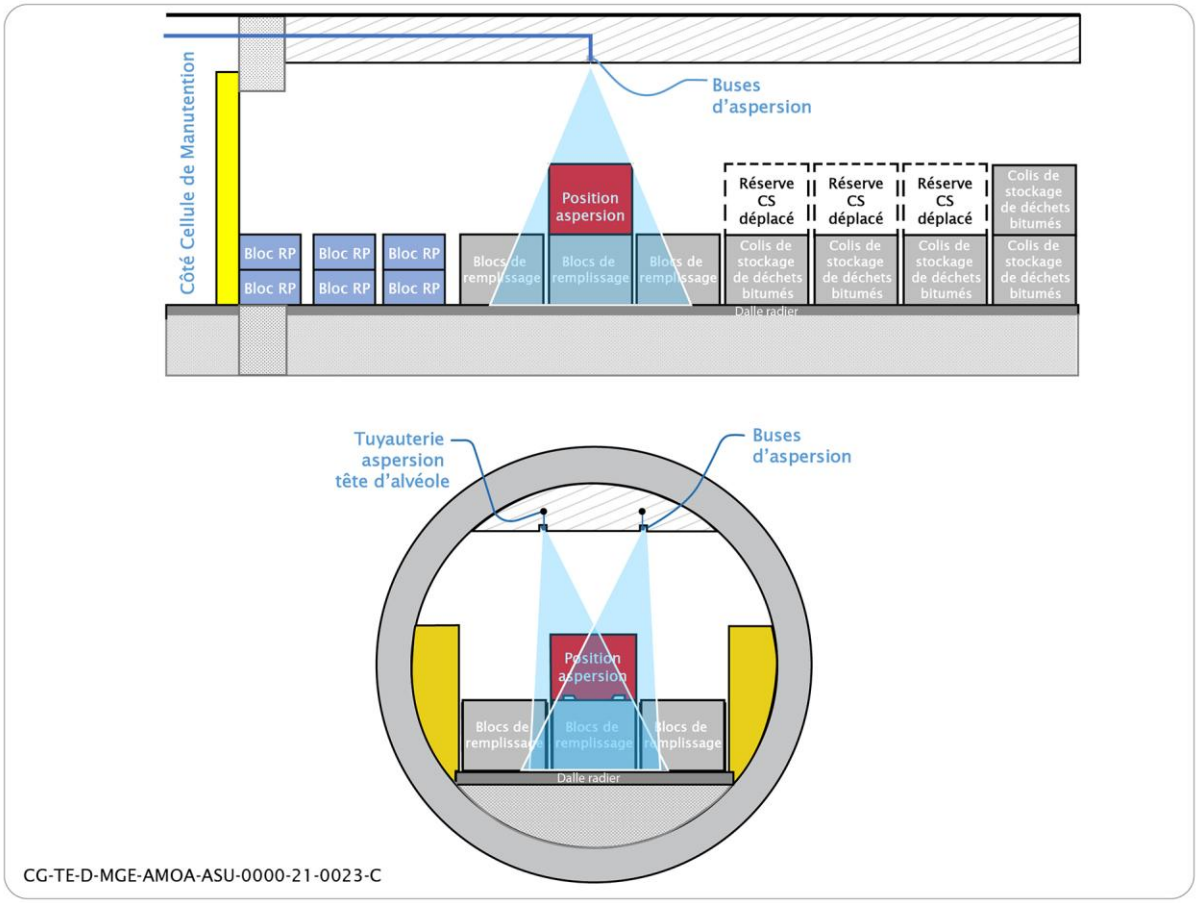


Figure 4-10 *Schéma de principe d'implantation de la rampe d'aspersion d'eau dans la zone d'isolement, dans un alvéole dédié au stockage en l'état des colis de déchets bituminés et mis en conteneur renforcé vis-à-vis de l'incendie*

À la fin du chargement de la première nappe de colis, des blocs en béton sont positionnés sur cette zone afin de limiter la hauteur d'une potentielle chute lors du chargement de la seconde nappe de colis.

Compte tenu des équipements (pont polyvalent, robot d'intervention, rampe d'aspersion en zone d'isolement) pouvant intervenir dans l'alvéole dédié au stockage des déchets bitumés en l'état, l'alvéole est équipé d'un système de récupération des effluents générés en cas d'intervention, le sens du pendage d'un alvéole conditionne la conception du système de récupération des effluents :

- pour un alvéole localisé au sud du quartier de stockage MA-VL : la pente ramène les éventuels effluents vers la cellule de manutention ;
- pour un alvéole localisé au nord du quartier de stockage MA-VL : la pente ramène les éventuels effluents vers la jonction de retour d'air (une canalisation implantée dans le radier permet le transit des effluents recueillis dans la jonction de retour d'air vers la cellule de manutention).

4.4 L'analyse de la flexibilité vis-à-vis des deux voies de gestion envisagées vis-à-vis de la sûreté

La demande d'autorisation de création de l'INB Cigéo traite sans préférence une voie de gestion des déchets bitumés comparée à l'autre. De plus, le choix de la stockabilité en l'état des déchets bitumés ne signifiant pas l'absence totale d'enrobé retraité, la conception se doit, au titre de la flexibilité, d'intégrer les deux voies possibles. Pour ce faire, l'ensemble est dimensionné sur la base du cas le plus contraignant en fonction du scénario étudié.

Les deux voies de gestion envisagées se distinguent d'une part par la nature des colis (déchets et conteneurs), d'autre part par le nombre d'alvéoles MA-VL de stockage nécessaire à leur prise en charge.

L'incidence de la variation du nombre d'alvéoles n'est pas un sujet spécifique aux déchets bitumés. Il est couvert par la flexibilité à la variation du nombre d'alvéoles de manière générale.

La flexibilité vis-à-vis de la nature des colis et en conséquence du conditionnement retenu pour les déchets bitumés est traitée spécifiquement. Ainsi les natures des colis et conditionnements considérés dans les études sont à ce stade les suivants :

- les résidus de traitement des déchets bitumés se présentent sous la forme de matrices de verre conditionnées dans des conteneurs primaires de type « CSD » (cf. Chapitre 4.2.2.2 du présent volume) sont introduits en conteneurs de stockage MA-VL de type CS2 ;
- les déchets bitumés conditionnés dans des fûts métalliques (dit « en l'état ») sont introduits dans des conteneurs de stockage MA-VL renforcés vis-à-vis de l'incendie de type CS4.1 et CS4.2.

4.4.1 L'analyse du point de vue de la sûreté après-fermeture

4.4.1.1 Le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques hors des colis primaires

Les cinétiques de relâchement des radionucléides/toxiques chimiques reposent sur l'évolution des colis de déchets en conditions de stockage. Le conditionnement des déchets a une influence sur ce relâchement mais elle est mineure (cf. Chapitre 3.1.1.1 du présent volume). La démonstration de sûreté présentée au volume 8 du présent rapport, couvre le cas du stockage des déchets bitumés en l'état en prenant en compte le modèle de relâchement qui lui est propre. Pour les colis de déchets issus du traitement des déchets bitumés, leurs conditionnements étant similaires à certaines familles de colis MA-VL, ils sont également aussi couverts par cette démonstration.

4.4.1.2 Les perturbations issues des colis de déchets

4.4.1.2.1 Les perturbations physico-chimiques

Les déchets bitumés contiennent des complexants organiques qui sont susceptibles d'influencer la migration des radionucléides. La présence de ces complexants est prise en compte dans les évaluations de sûreté après-fermeture et à travers les dispositions de co-stockage physico-chimiques. La neutralisation des bitumes aurait pour effet de diminuer la quantité de complexants organiques, les études de sûreté après-fermeture réalisées sont ainsi conservatives du point de vue de la prise en considération de ces complexants.

4.4.1.2.2 Les perturbations THM

Pour le quartier de stockage MA-VL, il n'y a pas d'incidence de la THM (cf. Chapitre 3.1.1.2.2 du présent volume).

Quel que soit le mode de gestion envisagé, les déchets bitumés n'étant pas exothermiques, les perturbations thermiques et THM liées aux déchets eux-mêmes sont de facto sans objet (cf. Chapitre 3.1.1.2.2 du présent volume).

Dans le cas particulier d'un co-stockage des colis de déchets bitumés, issus d'un traitement, en espace intercalaire des colis de stockage HA, les mêmes exigences que celles pour les colis HA s'appliquent et conduisent donc aux mêmes spécifications sur le conteneur de stockage (durée d'étanchéité couvrant la durée de la phase thermique et la période de décroissance des radionucléides à vie courte et moyenne).

4.4.1.2.3 Le gonflement sous eau de la matrice bitumineuse

La démonstration de sûreté après-fermeture de la présente version préliminaire du rapport de sûreté couvre les risques les plus conséquents parmi les deux voies de gestion en analysant le risque de gonflement sous eau des déchets bitumés (cf. Chapitre 2 du volume 8 et la connaissance acquise retranscrite dans le volume 7 du présent rapport). Cette analyse montre que le gonflement sous eau n'induit pas d'extension de la zone de Callovo-Oxfordien initialement endommagée en champ proche de l'alvéole lors du creusement. Ainsi la représentation de la zone endommagée de la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche des alvéoles dans les scénarios de sûreté après-fermeture n'est pas dépendante de la voie de gestion retenue.

4.4.1.2.4 La criticité en après-fermeture

Le risque de criticité a été étudié pour le stockage des déchets bitumés en l'état. Dans la mesure où, d'une part les colis de déchets bitumés se caractérisent par des masses de matières fissiles faibles au regard des autres colis de l'inventaire MA-VL et, d'autre part, que des adaptations de la spécification de production peuvent être envisagées, l'évolution à la marge de la teneur en matière fissile des colis issus du traitement (concentration de matières fissiles augmentée par la réduction du nombre de colis) n'est pas de nature à mettre en cause le stockage des colis de déchets en question.

4.4.2 L'analyse du point de vue de la sûreté en phase de fonctionnement

En fonction du risque étudié lors de la phase de fonctionnement, la voie de stockage des déchets bitumés la plus pénalisante peut être différente.

Les colis de déchets bitumés pris en l'état dimensionnent les installations au regard de leur sensibilité à la température en fonctionnement normal et en cas de situations accidentelles d'incendie et, en conséquence, constituent l'essentiel des développements du présent chapitre (cf. Chapitre 4.4.2.2 du présent volume).

Concernant les colis issus d'un traitement des fûts de déchets bitumés, l'incidence est par nature minimisée, elle est précisée ci-après (cf. Chapitre 4.4.2.1 du présent volume) sur la base des caractéristiques des colis envisagés définis au chapitre 4.2.2 du présent volume.

4.4.2.1 Le cas des colis issus du traitement des déchets bitumés

Vis-à-vis de la sûreté d'exploitation le remplacement de la matrice bitumineuse par une matrice vitreuse permet d'assurer une bonne capacité de confinement des substances et de limiter ainsi leur dispersion en situation accidentelle ; l'activité par colis issus d'un traitement des déchets bitumés peut être supérieure d'un facteur 2 à 4 (facteur proportionnel au taux de réduction de volume) à celle des colis de déchets bitumés en l'état compte tenu des hypothèses de traitement retenues à ce stade : conservation de l'activité radiologique, réduction de volume.

Le niveau d'activité de tels colis reste toutefois couvert par d'autres colis de l'inventaire de référence en termes de caractéristiques supports au dimensionnement de l'INB (cf. Chapitre 4 du volume 3 du présent rapport). Par ailleurs, ils devront être conditionnés pour respecter les spécifications d'acceptation des colis (5).

Ainsi, à ce stade, aucune disposition de sûreté supplémentaire n'est identifiée pour leur réception et leur stockage dans l'INB Cigéo.

4.4.2.2 Le cas de la prise en charge des colis de déchets bitumés en l'état

La prise en charge des colis de déchets bitumés en l'état suit le même process que tous les autres colis de l'inventaire de référence (cf. Chapitres 4 et 6 du volume 5 du présent rapport), en l'occurrence au sein :

- du bâtiment nucléaire de surface EP1 qui est le siège d'opérations allant de la réception des emballages de transport des colis primaires jusqu'à la mise à disposition des hottes chargées de colis de stockage au niveau de la tête de descenderie colis pour permettre leur transfert vers les ouvrages souterrains ;
- de l'installation souterraine, où les hottes de transfert chargées des colis de stockage transitent par le funiculaire *via* la descenderie colis et par les chariots de transfert *via* les galeries de liaison jusqu'à l'alvéole MA-VL.

Des règles de dimensionnement relatives à la gestion des colis de déchets bitumés en l'état dans l'INB sont établies : il s'agit de ne pas dépasser une température pour les colis de déchets bitumés de 100 °C. Cette valeur de conception permet de disposer de marges importantes vis-à-vis du risque de déclenchement de réactions exothermiques pouvant conduire à un emballement des déchets bitumés. Elle sera réévaluée sur la base d'avancées de la connaissance dans le cadre d'une nouvelle itération connaissance/conception/sûreté qui par exemple pourra être alimentée par les résultats des études du programme Babylone (cf. Pièce 20 « Plan de développement de l'installation de stockage Cigéo » (22)).

La conception et le dimensionnement du bâtiment nucléaire de surface EP1 ainsi que la démonstration de sûreté (cf. Volume 9 du présent rapport) intègrent la prise en charge des colis de déchets bitumés stockés en l'état, en particulier vis-à-vis de la maîtrise du risque « incendie » : le bâtiment nucléaire de surface présente des secteurs de feu et des secteurs de confinement permettant de récupérer la dispersion de substances radioactives remises en suspension en cas d'incendie impliquant un colis de déchets bitumés.

La conception du quartier de stockage MA-VL et son dimensionnement intègrent des alvéoles dédiés au stockage des colis de déchets bitumés vis-à-vis du risque incendie. Les dispositions spécifiques de conception de l'alvéole de stockage MA-VL pour la maîtrise du risque « incendie » dédiée aux colis de déchets bitumés stockés en l'état sont présentées au chapitre 4.4.2.3 du présent volume.

4.4.2.2.1 Le transfert des colis primaires dans le bâtiment EP1 et préparation des colis de stockage

Les opérations de gestion des colis de déchets bitumés en l'état dans le bâtiment nucléaire de surface EP1 font l'objet de spécificités par rapport aux autres typologies de colis. Celles-ci s'ajoutent à celles décrites dans le chapitre 4 du volume 5 du présent rapport.

L'utilisation de la zone tampon disponible dans la cellule de déchargement des colis primaires de l'emballage de transport est interdite aux colis de déchets bitumés pris en l'état.

Le bâtiment nucléaire de surface EP1 est également conçu pour prendre en compte la réception des colis de déchets bitumés, notamment les dispositions relatives à l'incendie (détection, extinction).

Lors d'opérations de transit, les colis de déchets bitumés sont transférés dans un conteneur de stockage muni de son couvercle. Ce conteneur est transféré vers la zone tampon principale (cf. Chapitre 4.4.2.2.2).

Dans le cas d'un transfert vers la zone de contrôle hors flux, le colis de stockage renforcé est orienté vers la cellule de préparation des colis de stockage de la zone de contrôle hors flux. Le colis de déchets bitumés est extrait du conteneur de stockage puis manutentionné seul vers une des cellules de contrôles hors flux.

Lors de ce transfert du colis de déchets bitumés sans son conteneur de stockage, en complément des systèmes d'extinction embarqués sur le transbordeur de chariot palette et sur le chariot palette, un système fixe d'extinction par déluge est implanté dans le couloir de circulation des transbordeurs. La conception du bâtiment de surface intègre la présence de secteurs de confinement autour de ces couloirs de circulation des transbordeurs vis-à-vis des risques liés aux colis de déchets bitumés. L'évaluation des conséquences radiologiques d'un scénario d'incendie impliquant un colis de déchets bitumés est présentée au chapitre 4.4.2.3 du présent volume.

4.4.2.2.2 La mise en zone tampon des colis de stockage

Après passage dans la cellule de contrôle C5 (contrôle de réception des colis primaires), les colis de déchets bitumés sont placés dans leur conteneur de stockage. Ce dernier est positionné sur une palette qui est entreposée dans un des emplacements de la zone tampon principale. Un système de détection incendie est implanté dans ces locaux en complément des systèmes embarqués au niveau des armoires électriques des équipements de transfert (transbordeurs et chariots).

Un système d'extinction de type déluge est mis en place dans cette zone tampon, incluant les couloirs de circulation du transbordeur. Ce système vient en complément du système d'extinction embarqué dans les armoires électriques. Il limite la durée d'un incendie et ainsi les températures atteintes au niveau des colis présents dans cette zone tampon. Il permet également d'empêcher la propagation d'un éventuel emballement d'un colis aux colis voisins.

Par ailleurs, les conteneurs de stockage renforcés vis-à-vis de l'incendie (cf. Chapitre 4.3.2 du présent volume) contribuent à la limitation des effets d'un incendie sur les colis et à l'absence d'emballement de réactions exothermiques.

4.4.2.2.3 L'évaluation des conséquences radiologiques d'un scénario d'incendie impliquant un colis de déchets bitumés dans le bâtiment EP1

Les situations d'incendie impliquant un colis de déchets bitumés concernent un incendie du transbordeur dans les couloirs de circulation de la zone tampon ou de la zone de contrôle hors flux ou un incendie du robot de contrôle dans une cellule de contrôle C5 (cf. Volume 9 du présent rapport et la « Note d'analyse des risques liés à l'incendie en zone nucléaire » (25)). La sectorisation incendie et les secteurs de confinement associés permettent de collecter la dispersion de substances radioactives en cas d'incendie impliquant un colis de déchets bitumés.

L'évaluation des conséquences radiologiques de ces situations impliquant un colis de déchets bitumés conduit à une dose maximale reçue sur le public situé à Bure de l'ordre de 1,2 µSv sur 24 heures et de 15 µSv sur 1 an et sur le public situé à Saudron de 0,25 mSv sur une durée d'exposition de 50 ans, en considérant l'hypothèse d'une inflammation et combustion du contenu du colis de déchets bitumés. Les objectifs de radioprotection retenus (cf. Volume 2 du présent rapport) sont respectés.

4.4.2.2.4 Le transfert dans l'installation souterraine

Lors du transfert des colis de déchets bitumés en conteneur de stockage du bâtiment nucléaire de surface EP1 vers les alvéoles de stockage, ceux-ci sont disposés dans une hotte de transfert qui assure leur protection jusqu'à leur déchargement et leur mise en place dans l'alvéole de stockage.

Comme exposé dans le chapitre 6 du volume 5 du présent rapport, l'installation souterraine et, en particulier, le quartier de stockage MA-VL dans son ensemble, sont dimensionnés pour accueillir en toute sûreté l'ensemble des colis de déchets de l'inventaire de référence.

La prise en charge des colis de déchets bitumés en l'état ne nécessite pas de dispositions complémentaires à celles présentées dans le volume 5 du présent rapport. Les seules dispositions complémentaires concernent l'alvéole MA-VL dédié au stockage des colis de déchets bitumés.

NOTE IMPORTANTE

Dans le cas des colis de déchets bitumés stockés en l'état, une conception spécifique de l'alvéole de stockage avec des dispositions complémentaires à celles présentées dans le volume 5 du présent rapport est définie afin de :

- maîtriser les risques d'incendie ;
- limiter les conséquences d'un incendie vis-à-vis de la dissémination des substances radioactives en dehors du colis de déchets bitumés ;
- exclure le risque d'emballement des réactions exothermiques à la suite d'un incendie sur un équipement du process de transfert.

La démonstration de l'adéquation de ces dispositions, notamment du pont polyvalent de l'alvéole et de la maîtrise des risques associés à un emballement d'un colis de déchets bitumés dans un colis de stockage, est développée dans le chapitre 4.4.2.3 du présent volume.

4.4.2.3 L'alvéole de stockage MA-VL dédié aux colis de déchets bitumés stockés en l'état

4.4.2.3.1 La démonstration de l'adéquation des dispositions mises en œuvre à la maîtrise d'un incendie

Les scénarios d'agression des colis de déchets bitumés par un incendie sont notamment ceux en cas d'incendie sur le pont polyvalent utilisé pour leur manutention en cellule de manutention et en partie utile de l'alvéole. Dans la cellule de manutention, les autres équipements présents sont également étudiés et considérés dans les scénarios d'agression. Il s'agit principalement de la table de réception et de l'élévateur.

Par conception, en cas d'incendie, il s'agit de maintenir une température de conception inférieure à 100 °C au niveau des colis de déchets bitumés.

Le renforcement des dispositions de maîtrise des risques d'incendie dans la cellule de manutention et la partie utile de l'alvéole dédié repose ainsi sur les dispositions complémentaires mises en œuvre et présentées dans les chapitres 4.4.2.3.1a) à 4.4.2.3.1c) du présent volume.

a) Les dispositions de prévention du risque d'incendie

La conception de l'alvéole et des équipements nécessaires à la mise en stockage des colis de déchets bitumés comme pour tout alvéole de stockage (cf. Chapitre 3.2 du volume 9 du présent rapport) repose sur :

- la limitation des charges calorifiques ;
- le choix de matériaux difficilement inflammable ;
- l'isolement des charges calorifiques les unes par rapport aux autres ;
- la présence de systèmes de détection et d'extinction embarqués sur les équipements mobiles et au plus près des sources de risque ;
- la présence de rétention pour contenir les écoulements de liquides inflammables.

b) Les dispositions de détection/surveillance

La détection d'un départ de feu et de son développement comprend les dispositions spécifiques suivantes :

- un système de détection embarqué sur le pont ;
- un système fixe de détection dans la cellule de manutention ;
- un système fixe de surveillance de la température dans la partie utile au moyen de fibres optiques placées dans le radier et en voûte.

Les systèmes d'extinction automatique sont également présents dans les différents coffrets et armoires électriques comme pour les autres alvéoles de stockage.

c) Les dispositions de limitation des conséquences

Après détection d'un départ de feu, si les systèmes d'extinction automatique situés au plus près des sources d'incendie sont inopérants, la limitation des conséquences nécessite la mise en œuvre de dispositifs d'intervention en vue de réduire le développement de l'incendie et son intensité puis de l'éteindre.

Un système fixe d'extinction à mousse est présent dans la cellule de manutention comme pour tout alvéole de stockage.

Pour la partie utile de l'alvéole, des dispositifs d'extinction complémentaires sont prévus :

- sur le pont polyvalent avec la mise en place d'un système d'extinction par brumisation d'eau, avec des réserves d'eau embarquées sur le pont ;
- avec la présence d'un robot de type monorail, suspendu sous la voûte, et muni d'une lance motorisée qui permet une aspersion avec de l'eau si besoin.

En complément, le conteneur de stockage en béton renforcé protège les colis de déchets bitumés qu'il contient en limitant les effets de l'incendie au sein du colis par sa résistance intrinsèque, notamment du béton qui le constitue et son épaisseur (effet retard et atténuation de l'intensité de la température interne engendrée).

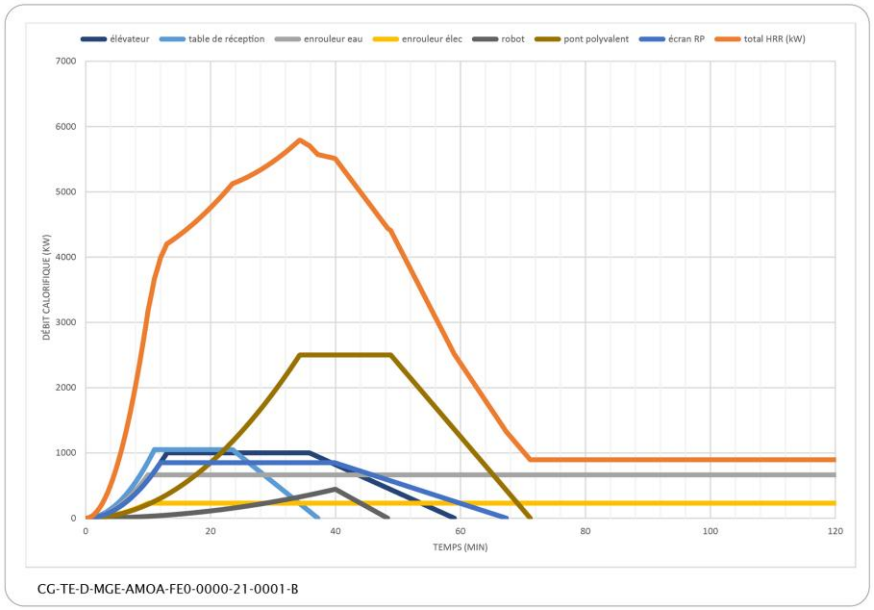
d) L'évaluation des conséquences d'un incendie

Les feux de référence associés à la charge calorifique du pont polyvalent

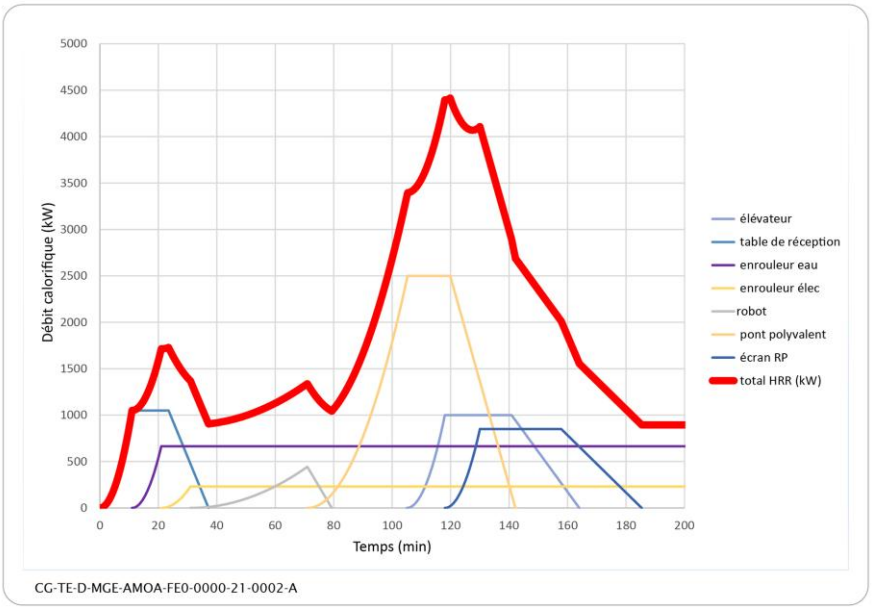
Conformément aux principes de conception retenus (cf. « Dossier de justification de la conception du process nucléaire souterrain » (26) et « Dossier de justification de la conception des alvéoles dédiés au stockage des colis de déchets bitumés mis en conteneur renforcé vis-à-vis de l'incendie » (24)), les charges calorifiques du pont polyvalent sont limitées. Compte tenu des fonctions attendues et donc des équipements complémentaires du pont polyvalent (cf. Chapitre 4.3.2.4 du présent volume), ceux-ci apportent une charge calorifique supplémentaire de près de 1 900 MJ conduisant à une charge calorifique du pont polyvalent de l'ordre de 5 600 MJ comparativement à celle d'un pont stockeur de l'ordre de 3 700 MJ.

Les différents scénarios de développement et de propagation du feu au sein du pont et des équipements présents en cellule de manutention conduisent à identifier deux feux[13] de références dits « courts » et « longs ». Les courbes de ces feux de référence sont plus pénalisantes que la courbe de feu d'un incendie du pont seul dans la partie utile de l'alvéole. Elles sont illustrées sur la figure 4-11.

[13] Pour un scénario de feu court, toutes les charges calorifiques commencent à brûler dès le début du scénario alors que pour un scénario de feu long, les charges calorifiques brûlent au fur et à mesure de la propagation de l'incendie.



Scénario court



Scénario long

Figure 4-11 Courbes de feu du scénario court (à gauche) et du scénario long (à droite) d'incendie en cellule de manutention

Les modélisations de l'incendie et du transfert thermique

L'évaluation des conséquences d'un d'incendie sur les colis de déchets bitumés se décompose en deux étapes :

1. la modélisation de l'incendie effectuée pour définir les flux de chaleur reçus par les colis de stockage (conteneurs béton contenant les colis de déchets bitumés) ;
2. l'utilisation des résultats de cette modélisation dans un modèle de transfert thermique pour définir les températures atteintes dans les colis de stockage.

Les modélisations sont réalisées pour les deux types de scénarios d'incendie : courts et longs. Les principales hypothèses postulées de ces modélisations sont les suivantes :

- la température initiale au sein du colis de déchets bitumés est de 30 °C (température supérieure à la température moyenne d'exploitation de l'alvéole) ;
- l'incendie se déroule sans considérer les moyens d'extinction ;
- les conditions d'ambiance dans le local ne réduisent pas l'intensité de l'incendie (non prise compte de l'oxyprivation).

Les résultats des évaluations et enseignements

Les courbes de températures au niveau de la surface des colis de déchets bitumés en fonction du temps obtenues sont représentées sur la figure 4-12.

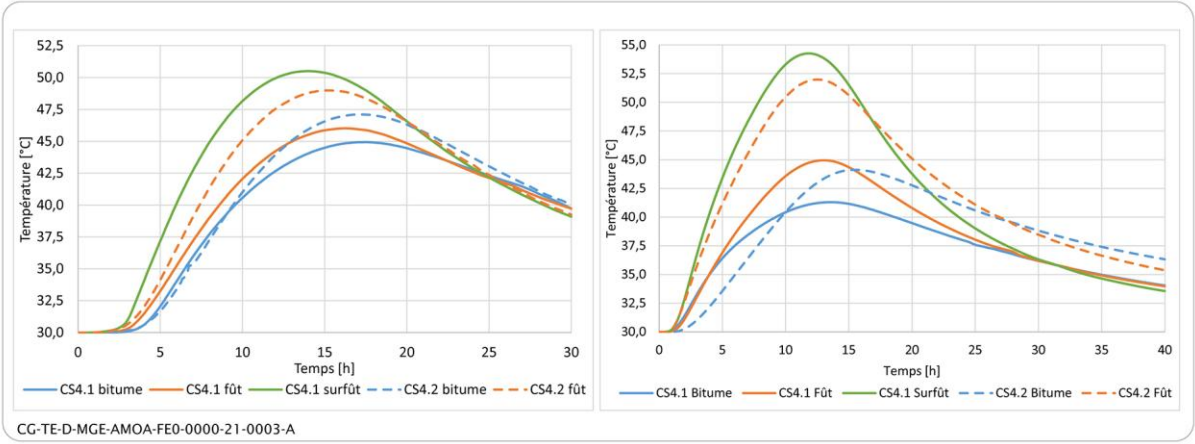


Figure 4-12 *Courbes de température des éléments intérieurs des colis CS4 sous les sollicitations du scénario long (à gauche) et du scénario court (à droite) en cellule de manutention*

Le tableau 4-3 synthétise les résultats obtenus pour les scénarios d'incendie.

Tableau 4-3 *Synthèse des températures maximales évaluées au niveau des colis de déchets bitumés pour les scénarios d'incendie en cellule de manutention et en alvéole de stockage de colis de déchets bitumés*

Scénario	CS4.1, température maximale des colis de déchets bitumés	CS4.2, température maximale des colis de déchets bitumés
Scénario 1 d'incendie court en cellule de manutention	41 °C	44 °C
Scénario 2 d'incendie long en cellule de manutention	45 °C	47 °C
Scénario 3 d'incendie du pont polyvalent en partie utile de l'alvéole	33 °C	37 °C

La figure 4-13 ci-après illustre les champs de températures dans les colis de déchets bitumés.

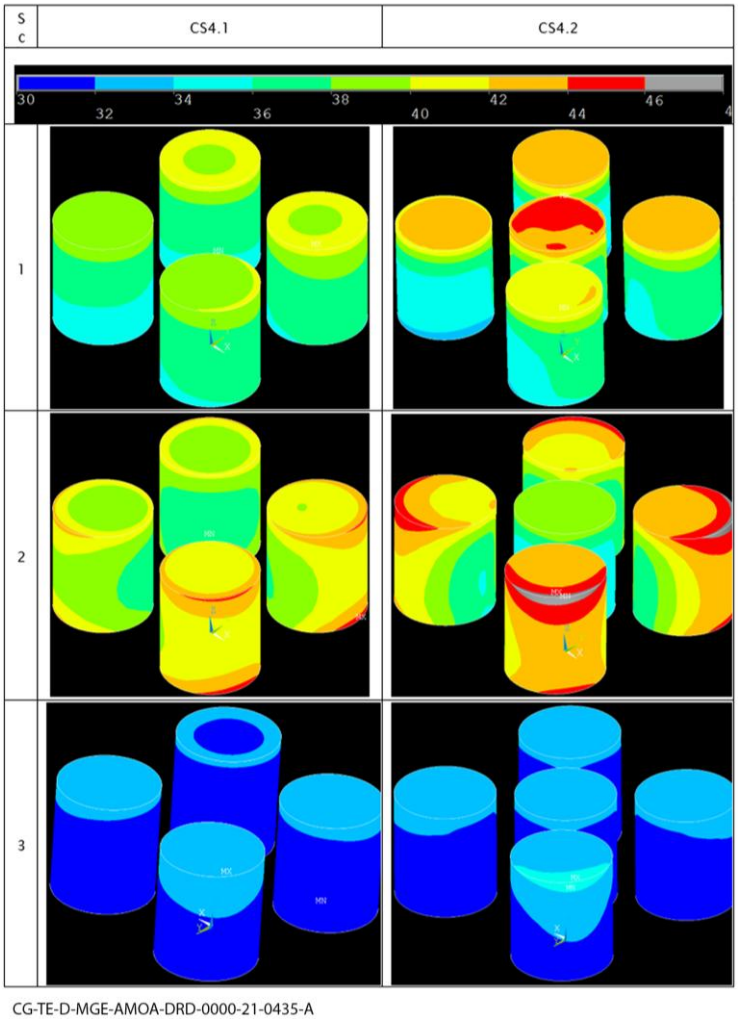


Figure 4-13 *Illustration des champs de températures des colis de déchets bitumés soumis à différents scénarios d'incendie (scénario 1 = scénario court et scénario 2 = scénario long en cellule de manutention, scénario 3 en partie utile de l'alvéole)*

Les simulations réalisées montrent que les échauffements des déchets bitumés sont limités et localisés principalement sur les côtés et en partie haute des colis, du côté des flammes issues de l'incendie.

L'épaisseur importante de béton des conteneurs de stockage (corps et couvercle) permet d'amortir les sollicitations thermiques sur les colis de déchets bitumés contenus dans ces conteneurs.

La température des colis et des déchets bitumés ne dépasse pas 50 °C. Les modélisations réalisées montrent que pour les différents scénarios incendie en cellule de manutention et en alvéole, le critère de 100 °C est respecté et in fine la température atteinte reste bien en dessous de ce critère.

La conception retenue pour le stockage en l'état des colis de déchets bitumés permet de maîtriser les risques liés à un incendie en cellule de manutention ou en partie utile de l'alvéole de stockage.

4.4.2.3.2 La démonstration de l'adéquation des dispositions mises en œuvre pour la gestion d'un emballement postulé dans un colis de déchets bitumés

a) L'identification et la présentation du scénario d'emballement postulé[14]

Le scénario d'emballement d'un colis de déchets bitumés dans un colis de stockage au sein de l'alvéole de stockage est postulé.

Au stade des connaissances actuelles, les scénarios suivants peuvent être envisagés en fonction de la phénoménologie considérée pour l'emballement des réactions exothermiques :

- le scénario extrême considère l'inflammation et l'entretien de la combustion des déchets bitumés malgré l'absence d'oxygène dans le conteneur de stockage ; la production de fumées s'échappe par les espaces disponibles au niveau de l'interface corps du conteneur/couvercle ;
- le scénario extrême considère que les déchets bitumés du colis pyrolysent, que des gaz inflammables sortent du conteneur par les espaces disponibles au niveau de l'interface corps du conteneur/couvercle et qu'ils s'enflamment en sortie en postulant la présence d'un initiateur.

Les caractéristiques intrinsèques (béton, épaisseur, dispositif de fermeture) du conteneur de stockage renforcé permettent d'assurer le maintien en place de son couvercle lors d'un emballement de réactions exothermiques dans un colis de déchets bitumés. Les éléments de justification sont apportés dans le « Dossier de justification de la conception du conteneur de stockage des colis MA-VL » (27), et le « Dossier de justification de la conception des alvéoles dédiés au stockage des colis de déchets bitumés mis en conteneur renforcé » vis-à-vis l'incendie (24).

Concernant le scénario extrême avec inflammation des déchets au sein du conteneur de stockage, la modélisation d'une température interne de plus de 900 °C pendant huit heures montre que la propagation de la chaleur vers les conteneurs de stockage voisins est limitée et n'atteint pas la température de conception fixée à 100 °C.

Pour le scénario extrême qui considère l'inflammation des gaz produits par la pyrolyse des colis de déchets bitumés lors de leur sortie du conteneur, la situation qui conduit aux effets thermiques les plus pénalisants sur le colis de stockage adjacent est celle qui sollicite le colis situé au-dessus (cf. Figure 4-14). C'est cette situation qui est évaluée au chapitre 4.4.2.3.2e) du présent volume.

[14] La demande formulée par l'ASN dans son courrier (17) est la suivante : *« [Andra-Art46-1] Je vous demande de définir et de considérer un scénario d'emballement et de perte de confinement d'un colis de déchets bitumés dans un colis de stockage, afin d'identifier les dispositions nécessaires pour limiter les conséquences de ce scénario et pour garantir l'absence de propagation de l'emballement aux colis de stockage voisins. ».*

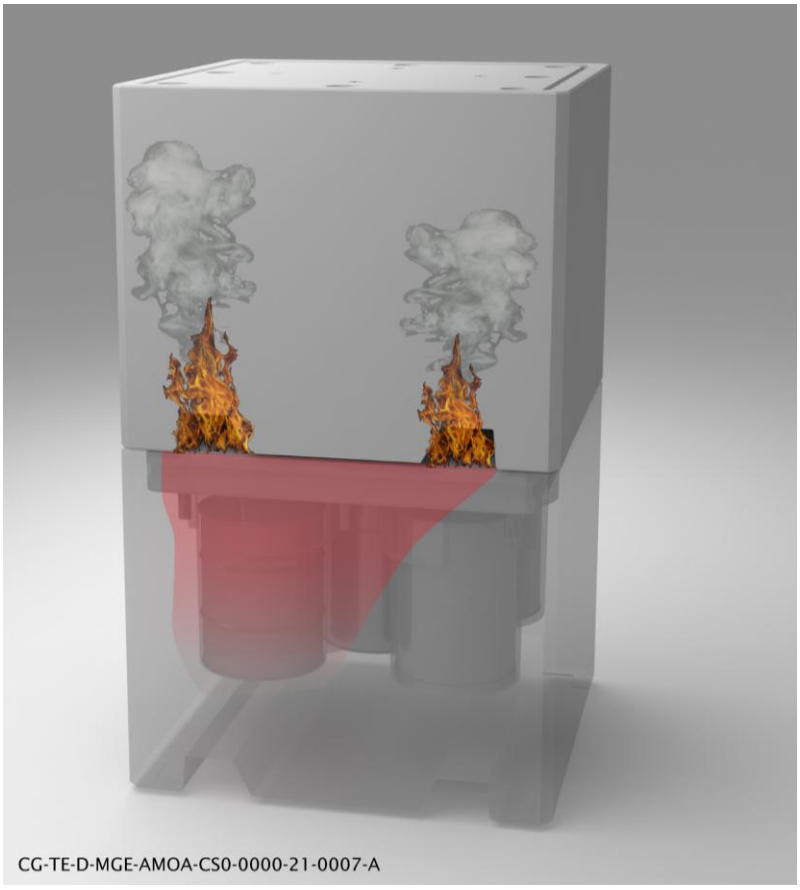


Figure 4-14 *Illustration du scénario extrême d'emballement d'un colis de déchets bitumés dans un conteneur*

Le renforcement des dispositions de maîtrise des risques liés aux effets d'un emballement postulé d'un colis de déchets bitumés au sein de l'alvéole repose sur des dispositions mises en œuvre sur les différents niveaux de la défense en profondeur, décrites dans le chapitre 4.3.2 du présent volume et rappelées ci-après.

b) Les dispositions de prévention

L'absence de conséquences sur les autres colis de stockage situés dans l'alvéole est basée sur l'exigence de conception de maintenir une température inférieure à 100 °C au niveau des colis de déchets bitumés.

Les principales dispositions de prévention reposent sur :

- la connaissance des colis de déchets bitumés stockés dans l'alvéole (caractérisation, spécification d'acceptation, agrément des familles de colis de déchets) ;
- la nature et le dimensionnement du conteneur de stockage en béton renforcé qui accueille les colis de déchets bitumés et garantit son bon comportement à une telle situation ; on peut notamment citer une épaisseur suffisante pour atténuer la propagation de la chaleur, une formulation béton avec des fibres de polypropylène permettant de conserver son épaisseur et un système de fixation du couvercle robuste ;
- la capacité à détecter au plus tôt une élévation de température au niveau d'un colis et la possibilité de déplacer ce colis identifié et d'intervenir ; pour cela, il est retenu de laisser libre la troisième nappe de stockage.

c) Les dispositions de détection/surveillance d'une élévation de température

En complément des dispositifs de surveillance prévus pour l'ensemble des alvéoles MA-VL (cf. « Dossier de justification de la conception de l'alvéole MA-VL (28)) tels que la présence de sondes de température, de colmatage et de détection de fumées en sortie de l'alvéole au niveau de la filtration de très haute efficacité et la surveillance assurée par les opérateurs depuis la salle de commande centralisée, la conception de l'alvéole de stockage des colis de déchets bitumés prévoit la présence d'un système fixe de surveillance dans la partie utile de l'alvéole par l'implantation d'un réseau de fibres optiques dans le radier et en voûte.

Ces dispositions de surveillance permettent de détecter rapidement une élévation de température et de déclencher la mise en œuvre des dispositions de limitation des conséquences prévus tels que le déplacement du colis incriminé, le déploiement des moyens d'extinction disponibles : soit le système d'extinction embarqué dans le pont polyvalent, soit le robot d'intervention, soit le système d'extinction fixe situer dans la zone dédiée en tête d'alvéole.

d) Les dispositions de limitation des conséquences d'un emballement_postulé

Dès lors qu'un tel évènement est suspecté *via* les dispositifs de détection et de surveillance, plusieurs dispositions de limitation des conséquences sont disponibles et à disposition de l'exploitant afin de le gérer.

Les gestions possibles d'une situation d'emballement postulée d'un colis de déchets bitumés au sein d'un conteneur de stockage

Pour maîtriser les conséquences d'un emballement postulé d'un colis de déchet bitumés au sein d'un conteneur de stockage en alvéole, la conception de l'alvéole dédié aux colis de déchets bitumés met à disposition de l'exploitant plusieurs solutions de gestion :

- isolement du colis incriminé en alvéole par déplacement des colis adjacents par le pont polyvalent de manutention et aspersion du colis de stockage par le pont polyvalent ou par le robot d'intervention ;
- déplacement et isolement du colis incriminé dans la zone dédiée en tête d'alvéole et aspersion du colis de stockage par le système fixe ;
- aspersion du colis de stockage incriminé par le pont polyvalent ou le robot d'intervention sans déplacement de colis.

Pour la conception des systèmes de refroidissement (le pont polyvalent, le robot d'intervention, le système fixe en tête d'alvéole), l'eau retenue comme agent refroidissant permet d'avoir un bon contact avec le colis et une bonne capacité à prendre des calories.

Le système d'extinction fixe en tête de la partie utile de l'alvéole après déplacement du colis

Selon la cinétique de l'événement observé et la position du colis au sein de l'alvéole, le pont polyvalent peut transférer le colis dans lequel se déroulerait l'emballement au niveau de la zone d'isolement située en tête de la partie utile de l'alvéole. Celle-ci est équipée d'un système d'aspersion fixe.

Le système d'extinction embarqué sur le pont polyvalent

Le pont polyvalent est équipé d'un système complémentaire d'aspersion d'eau des colis de stockage, les réserves d'eau étant embarquées dans le pont. Ce système est utilisé pour mener une opération de refroidissement et limiter la propagation d'une onde thermique vers les colis voisins ou une opération d'extinction de flammes qui seraient présentes au niveau du colis. Le pont peut desservir toutes les zones de la partie utile de l'alvéole.

Le robot d'intervention

Un robot d'intervention est positionné en cellule de manutention et permet une levée de doute sur le colis de stockage et son aspersion avec de l'eau. Son déploiement est envisageable sous quelques dizaines de minutes.

L'aspersion depuis le robot d'intervention est réalisée par une lance motorisée (avec une portée entre le robot et le colis incriminé au moins égale à quelques rangs de colis).

e) L'évaluation des conséquences thermiques du scénario d'emballement postulé sur les colis adjacents

La modélisation du scénario d'emballement et du transfert thermique

Le scénario extrême d'emballement de réactions exothermiques au sein d'un colis de stockage de déchets bitumés est défini comme suit pour sa modélisation :

- un emballement postulé est associé à la pyrolyse du contenu d'un colis de déchets bitumés au sein d'un conteneur de stockage dont le couvercle reste en place ;
- les gaz produits par l'emballement sortent du conteneur au niveau de l'interface corps du conteneur/couvercle ;
- ces gaz s'enflamment au contact de l'air dans l'alvéole en considérant par défaut que la concentration des gaz au niveau des passages de fourches se situe dans la plage d'inflammabilité et qu'une source d'ignition est présente ;
- un colis de stockage se trouve au-dessus du colis dans lequel ces phénomènes sont postulés ; ce colis est exposé aux flammes ; les zones de combustion se situent uniquement au niveau des passages de fourche du colis du dessus et sont réparties de façon homogène au niveau des quatre emplacements des passages de fourches ;
- l'extinction de l'incendie est considérée, soit à l'issue du phénomène de pyrolyse au bout d'environ six heures (consommation de 10 % du colis), soit par les moyens d'extinction disponibles qui ne sont valorisés, de manière pénalisante, qu'au bout de huit heures (cf. Figure 4-15).

Les conséquences du scénario extrême d'emballement sont évaluées en deux temps : dans un premier temps par l'évaluation des flux thermiques reçus par le colis cible situé au-dessus du colis au sein duquel est postulé l'emballement, puis dans un deuxième temps par la modélisation de l'augmentation de la température au sein de ce colis au regard des flux thermiques reçus.

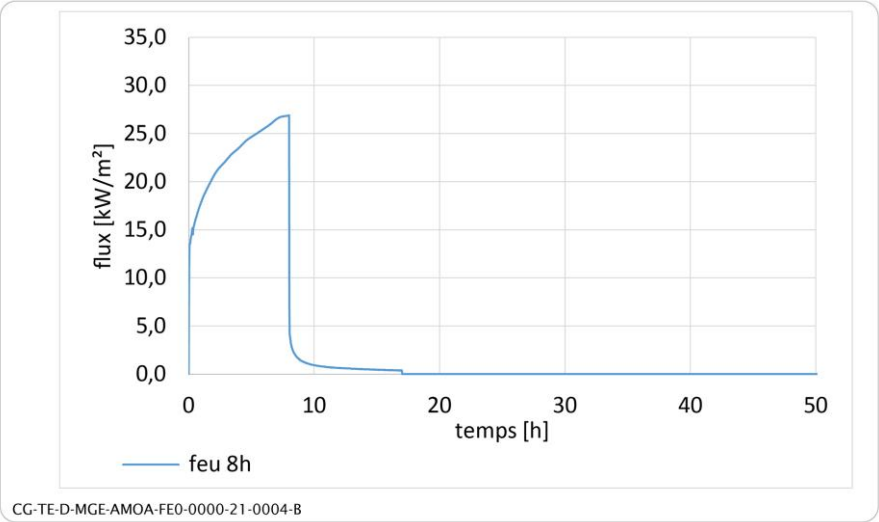


Figure 4-15 *Courbe incendie maximale appliquée pendant huit heures sur le colis de déchets bitumés stockés en l'état, pour le scénario d'emballement postulé sur les colis adjacents*

La modélisation du feu considère une montée en puissance très rapide du feu, celui-ci étant appliqué sur une surface représentant l'interface corps du conteneur/couvercle au niveau de l'espace libre des passages des fourches. Cette modélisation permet de disposer des flux thermiques reçus par les colis au cours de l'incendie.

La modélisation de l'incendie permet de simuler les flammes auxquelles est soumis le colis de stockage situé au-dessus du colis dans lequel est postulé l'emballement d'un colis de déchets bitumés et d'évaluer les flux thermiques reçus sur les différentes parties du colis.

Pour le transfert thermique, en fond du colis, un contact direct entre le béton du conteneur de stockage et les déchets bitumés est modélisé. Les espaces d'air disponibles sous les colis ne sont pas considérés. Cette hypothèse permet de maximiser les températures obtenues. Elle permet également d'évaluer l'évolution des températures au sein du colis au cours de l'incendie et d'identifier les températures maximales atteintes au niveau des déchets bitumés.

Les résultats des simulations thermiques et enseignements

Après huit heures d'incendie, les flux thermiques reçus par les différentes parties des colis de déchets bitumés sont les suivants :

- de l'ordre de 1 kW/m² sur la face avant ;
- de l'ordre de 4 kW/m² sur la face arrière ;
- de l'ordre de 30 kW/m² sur la face la plus exposée du passage de fourches.

Les autres colis stockés en alvéole reçoivent des flux inférieurs ou sensiblement équivalents à ceux évalués sur le colis situé au-dessus de celui dans lequel est postulé l'emballement.

Ces flux thermiques évalués constituent ensuite une donnée d'entrée du code de transfert thermique et sont utilisés pour estimer l'évolution des températures dans les colis adjacents. Les résultats de cette modélisation sur le colis situé au-dessus montrent que la température maximale est atteinte sur les déchets bitumés en fond de colis du conteneur de stockage situé au-dessus 10 heures[15] après le début de l'incendie. Cette température maximale est inférieure à 100 °C avec les hypothèses retenues pour la définition du scénario extrême postulé et pour la modélisation.

[15] Le pic de température atteint au sein du colis de stockage se situe deux heures après l'extinction de l'incendie en raison de l'inertie thermique apportée par le béton du conteneur de stockage.

Les résultats confirment l'absence de propagation de l'emballement postulé dans un colis de déchets bitumés au sein d'un conteneur de stockage aux colis de stockage voisins au sein de l'alvéole.

f) L'évaluation de l'impact radiologique aux populations

Sur la base de l'évaluation des conséquences thermiques, l'évaluation des conséquences radiologiques du scénario extrême considère la mobilisation du contenu radiologique d'un seul colis de stockage. Dans une approche pénalisante, il est considéré à ce stade que le terme source radiologique des 4 ou 5 colis de déchets bitumés présents dans le colis est sollicité. La gestion de ce scénario place en confinement statique l'alvéole de stockage ce qui ne permet pas de valoriser la performance de la filtration de très haute efficacité présente en aval de l'alvéole. Les principales hypothèses retenues sont les suivantes :

- hauteur de rejet à la cheminée du puits de ventilation air vicié exploitation (VVE) de la zone puits de 12 mètres ;
- condition météorologique la plus défavorable c'est-à-dire le cas F3 (classe de stabilité F « très stable » et vent à 3 $m.s^{-1}$) ;
- rétention des substances radioactives dans les gaines de ventilation non valorisée ;
- distance du lieu de vie situé à Bure ;
- fractions de remise en suspension pour les aérosols solides sont respectivement d'un pour les aérosols volatils et 5.10^{-2} pour les aérosols non volatils ;
- facteur de rétention pour le colis de stockage de 10^{-1} ;
- facteur de rétention de l'alvéole de 10^{-1} ;
- famille de colis enveloppe (activité) de l'ensemble des familles de déchets bitumés reçues.

La dose maximale sur 24 heures reçue par le public est de l'ordre de 0,7 mSv à Bure et reste inférieure à 0,75 mSv autour de la zone puits. Les objectifs de radioprotection retenus (cf. Volume 2 du présent rapport) sont respectés. Cette situation ne nécessite pas le besoin de mise à l'abri du public.

Les doses maximales autour de la zone puits sont détaillées et illustrées dans le tableau et la figure du chapitre 3.1 de l'annexe 3 du présent volume.

g) L'évaluation des impacts en termes de pollution radiologique et chimique des sols

Le scénario d'emballement postulé et retenu pour cette évaluation est le même que celui décrit au chapitre précédent.

Les concentrations maximales dans le sol et la contamination des salades autour de la zone puits sont présentées dans les tableaux du chapitre 3.2 de l'annexe 3 du présent volume.

Les valeurs de concentration maximale dans le sol en émetteurs alpha et émetteurs bêta gamma et de contamination des salades à différentes distances autour de la zone puits sont faibles inférieures aux limites de commercialisation Euratom pour les salades.

4.4.2.4 Les éléments importants pour la protection

En lien avec la démonstration de sûreté présentée ci-avant associée à la réception, la préparation et la mise en alvéole de stockage des colis de déchets bitumés selon la conception retenue, et en application de la méthode présentée au chapitre 2 du volume 9 du présent rapport de sûreté, les éléments importants pour la protection présentés dans le chapitre 13 du volume 9 du présent rapport de sûreté sont complétés comme suit :

- pour les EIP « nécessaires à l'accomplissement d'une ou plusieurs fonctions de sûreté » ;
  - ✓ le conteneur de stockage en béton renforcé vis-à-vis de l'incendie (dans le cas où des colis de déchets bitumés seraient stockés en l'état).
- pour les EIP « éléments internes à l'INB susceptibles d'agresser un ou plusieurs EIP nécessaires(s) à l'accomplissement ou au maintien d'une fonction de protection » :
  - ✓ le pont polyvalent pour les alvéoles de stockage dédiés aux colis de déchets bitumés.
- pour les EIP « nécessaires à la détection de situations incidentelles et accidentelles liées à l'incendie » :
  - ✓ les détecteurs incendie (fibres optiques) placés dans le radier et au niveau de la voûte et chaînes de remontée d'alarmes de la partie utile de l'alvéole de stockage dédié aux colis de déchets bitumés ;
  - ✓ le système de détection incendie en lien avec les détecteurs identifiés EIP ci-dessus.
- pour les EIP « nécessaires à la mise en état sûr de l'installation, au maintien dans cet état ou à la limitation des conséquences » :
  - ✓ les équipements de mise en sécurité incendie (clapets coupe-feu, portes…) concernés par la zone de détection incendie de la partie utile de l'alvéole ;
  - ✓ le système de mise en sécurité incendie en lien avec la zone de détection incendie de la partie utile de l'alvéole.

Il est à noter que les exigences définies assignées aux différents EIP listés précédemment sont présentées dans le document support (« Liste des EIP et exigences définies » (29)).

ANNEXES

Annexe 1 Extrait de la synthèse du rapport final de la revue d'experts de juin 2019 relatif à la gestion des déchets bitumés

« La revue externe sur la gestion des déchets bitumés s'est vu fixer trois objectifs par le ministre de la transition écologique et solidaire et l'Autorité de sûreté nucléaire (30) :

- *l'évaluation des connaissances scientifiques relatives à la caractérisation et au comportement des déchets bitumés ;*
- *l'évaluation de la pertinence des recherches en cours sur la neutralisation de la réactivité chimique des déchets bitumés ;*
- *l'évaluation de la pertinence des études conduites par l'Andra visant à modifier la conception de Cigéo pour exclure le risque d'emballement de réactions exothermiques.*

Après analyse du dossier initial constitué par l'Andra, le groupe de revue a procédé à l'audition des différents organismes français impliqués qui lui ont fourni un certain nombre de documents ou d'informations complémentaires. Par ailleurs, le groupe de revue a sollicité quelques experts internationaux reconnus dans le domaine des déchets nucléaires ou dans celui de la maîtrise du risque d'incendie dans les ouvrages souterrains, ce qui a permis d'enrichir et souvent de conforter les données disponibles au plan national.

Le groupe de revue a examiné les connaissances scientifiques disponibles sur la caractérisation et le comportement des déchets bitumés. Les résultats les plus significatifs sont issus du programme de recherche quadripartite conduit par le CEA avec EDF, Orano et l'Andra. Sur la base d'un ensemble de résultats expérimentaux et de simulations numériques, le CEA a conclu que, au-dessous d'une température des déchets bitumés de 150 °C, aucune réaction exothermique n'est à redouter et que seules des réactions faiblement énergétiques sont possibles entre 150 °C et 180 °C.

Le groupe de revue a examiné l'ensemble des résultats bruts sur lesquels s'appuient les études du CEA. Il a constaté que certains de ces résultats (thermogrammes) correspondent probablement à des points aberrants dus aux limites des appareillages ou des traitements. Le groupe propose que des expérimentations supplémentaires soient réalisées sur ces points, en répétant les mesures pour assurer la robustesse des conclusions. Le groupe estime vraisemblable que ces expérimentations complémentaires, en nombre limité, pourront permettre d'éliminer les points aberrants et de conforter une température minimale de déclenchement des réactions comprise entre 150 et 180 °C, ce qui serait cohérent avec les appréciations qui ont été recueillies auprès d'experts étrangers (Belgique, Japon) dans le cadre de la revue. L'IRSN, pour sa part, dans ses avis du 24 juillet 2018 postérieurs à l'examen du dossier d'options de sûreté, préconise de retenir pour la conception de Cigéo une température seuil de 100°C en peau des colis primaires afin de disposer pleinement de marges de sûreté eu égard à la variabilité des contenus des fûts d'enrobés bitumés.

Le groupe de revue a en effet constaté la variabilité importante de la composition des fûts, ainsi qu'une incertitude sur la répartition des sels à l'intérieur de ces fûts. Toutefois, le groupe estime que ces incertitudes pourraient être traitées en considérant une courbe de réaction (thermogramme) enveloppe des résultats obtenus (ou éventuellement plusieurs courbes enveloppes, chacune associée à une catégorie de fûts), qui représentera la réactivité maximale qui pourrait être rencontrée, y compris en cas de surconcentration locale. Pour établir ces courbes enveloppes, il est nécessaire de réaliser un nombre limité d'expériences complémentaires, avec des concentrations majorantes en sels les plus réactifs (essentiellement les nitrates), et des essais de répétabilité systématiques.

Les paramètres déduits de ces courbes de réaction enveloppes permettront d'alimenter et d'améliorer les simulations numériques utilisées par le CEA pour prédire l'évolution de la réactivité des enrobés et de leurs propriétés physiques. Le groupe de revue considère que la démarche de simulation numérique adoptée par le CEA est tout à fait pertinente. Il estime cependant nécessaire d'approfondir la validation du code de calcul en réalisant un essai réel à une échelle représentative, ainsi qu'un essai sur un enrobé artificiellement vieilli.

Le groupe de revue estime que les travaux complémentaires qu'il propose peuvent être réalisés dans un délai de quelques mois.

Le groupe de revue a examiné par ailleurs les recherches en cours sur la neutralisation de la réactivité des déchets bitumés. Le groupe n'a identifié à l'étranger (en Belgique et au Japon) que des travaux de recherche amont sur les procédés, qui ne sont pas actuellement poursuivis. En France, la maturité technique du dossier est encore très modeste et ne permet pas de démontrer aujourd'hui la faisabilité industrielle de cette neutralisation.

Pour parvenir à une telle démonstration, des travaux de recherche et développement très significatifs seraient nécessaires pour ce qui concerne par exemple le traitement des fumées issues de l'incinération des bitumes, le procédé d'introduction des déchets dans les fours, de façon à maîtriser notamment le risque de colmatage par du bitume ramolli, ou la maintenance des installations. Plus généralement, l'analyse de la sûreté des installations, qui n'a été qu'effleurée jusqu'ici, reste à réaliser, de même que la quantification des rejets, tant radioactifs que chimiques, qui seraient produits par l'installation en conditions normales de fonctionnement comme en situation accidentelle.

Compte tenu de l'ensemble de ces incertitudes, le groupe de revue considère qu'il serait prématuré d'émettre un avis formel sur les calendriers et les coûts. Il semble toutefois improbable que la mise en service d'une telle installation de neutralisation de la réactivité des déchets bitumés puisse intervenir avant 2040 et que son coût soit significativement inférieur à l'estimation présentée par le CEA en 2015.

S'agissant du choix des procédés, le groupe de revue estime que la sélection effectuée par le CEA, en collaboration avec EDF, Orano et l'Andra, est globalement pertinente. Toutefois, s'il était décidé de s'orienter vers l'industrialisation du traitement des bitumes, le groupe estime qu'il serait utile de réexaminer l'intérêt de la dissolution chimique du bitume avant le choix définitif du procédé à industrialiser.

En tout état de cause, le groupe de revue estime souhaitable de poursuivre les études sur la neutralisation de la réactivité des déchets bitumés. En effet, même s'il est finalement décidé de stocker en l'état les fûts de déchets bitumés dans Cigéo, on ne peut exclure que quelques-uns de ces fûts ne puissent pas satisfaire aux critères d'acceptation qui seront définis et doivent donc faire l'objet d'un traitement particulier.

Le groupe de revue a enfin examiné les études conduites par l'Andra en vue d'améliorer la conception de Cigéo pour exclure le risque d'emballement de réactions exothermiques. Le groupe observe que le dossier a progressé significativement pendant la durée des travaux de la revue, notamment dans la démarche scientifique appliquée à la caractérisation des colis.

Bien que toutes les études ne soient pas terminées, le groupe a la conviction que des dispositions techniques permettant un stockage des déchets bitumés dans Cigéo dans des conditions de sûreté acceptables peuvent être définies sur la base des techniques disponibles aujourd'hui en ingénierie, en s'appuyant sur une caractérisation détaillée des conteneurs, qui constituent une protection passive essentielle, et de leur interaction avec les fûts, et si nécessaire sur l'emploi de colis à paroi plus épaisse.

Les études conduites par l'Andra sont à cet égard pertinentes et devraient permettre d'arriver à court terme à une conception dont la sûreté pourrait être démontrée de façon convaincante. Le coût des évolutions de conception qui seront appliquées à Cigéo n'est pas encore connu précisément, mais il sera très probablement nettement inférieur au coût d'une neutralisation préalable de la réactivité des déchets.

Le groupe de revue souligne par ailleurs l'importance de la définition et de la stricte application par l'Andra, dans la durée, des conditions d'acceptation des colis, ainsi que des conditions de suivi et de contrôle d'exploitation, qui sont indispensables au maintien du niveau de sûreté d'une telle installation pendant les années d'exploitation prévues. ».

Annexe 2 Les différentes voies de traitement des fûts de déchets bitumés selon la note « Evaluation comparée des différents modes de gestion envisagés pour les déchets bitumés[16] »

2.1 La filière 1 « incinération/vitrification »

- procédé d'incinération-vitrification réalisé dans un équipement unique inspiré du procédé PIVIC (torche à plasma soufflé) développé pour les déchets métalliques et organiques contaminés par des émetteurs alpha, après découpe à froid pour alimenter ce procédé sous forme fractionnée ;
- production de déchets MA-VL sous forme de colis vitrifiés ;
- principales incertitudes à lever : adaptation et cadence du procédé de découpe, cadence de l'incinération-vitrification, faisabilité du procédé adapté aux déchets bitumés, développement des composants pour une exploitation en cellule blindée (nucléarisation) ;
- besoins de R&D pour développer le procédé de découpe des colis, vérifier la faisabilité et la performance du procédé d'incinération/vitrification et du traitement des gaz associé et le qualifier (besoin d'un prototype échelle 1), définir et qualifier le colis et la matrice ;
- durée de développement d'au moins 15 ans.

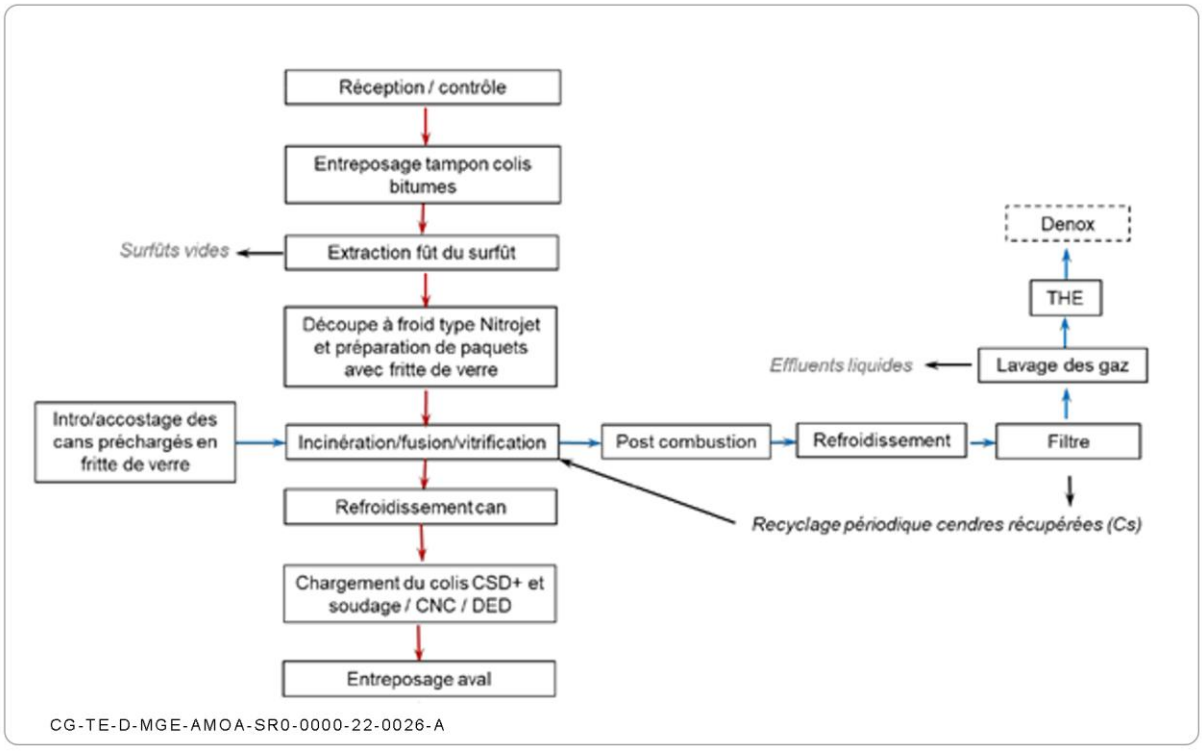


Figure Annexe 2-1 Diagramme fonctionnel du procédé de la filière 1 de traitement des déchets bitumés

[16] Cf. Note « Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs 2016-2018 : évaluation comparée des différents modes de gestion envisagés pour les déchets bitumés » (21).

2.2 La filière 2 « combustion classique et cimentation ou vitrification »

- opération de broyage et séparation fût/enrobé à froid suivie pour les enrobés fractionnés d'une combustion en four rotatif (type CENTRACO) et d'un post-traitement vitrification in can ou cimentation ;
- production de déchets MA-VL sous forme de colis vitrifiés en cas de vitrification, ou de déchets FMA-VC sous forme de fûts immobilisés en CBFK en cas de cimentation ;
- principales incertitudes à lever : définition et mise au point du procédé de séparation fût/bitume, transfert du produit froid vers le four chaud, comportement de l'enrobé dans le four, traitement des gaz, cadence des opérations ;
- besoins de R&D pour développer le procédé de cryobroyage, vérifier la faisabilité et la performance du procédé d'incinération et de fusion et du traitement des gaz associé et les qualifier (besoin d'un prototype échelle 1), définir et qualifier le colis et la matrice ;
- durée de développement d'au moins 15 ans.

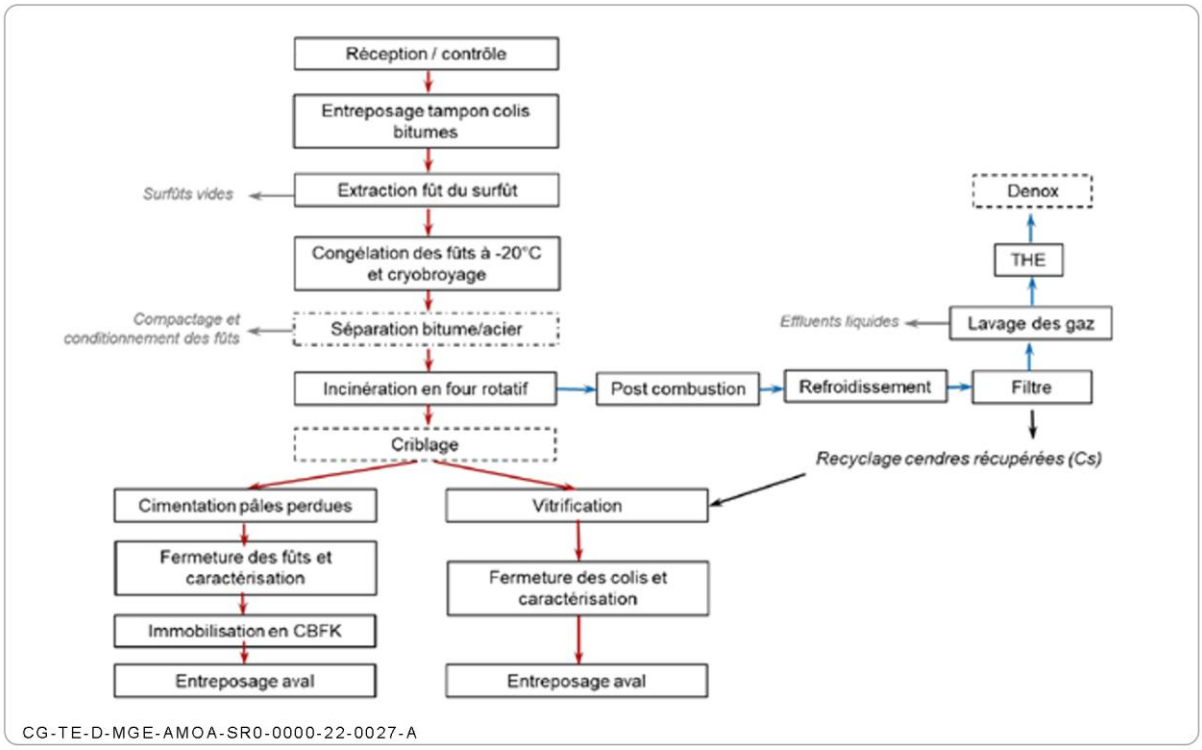


Figure Annexe 2-2 Diagramme fonctionnel du procédé de la filière 2 de traitement des déchets bitumés

2.3 La filière 3 « vaporeformage »

- traitement thermochimique en lit fluidisé permettant la transformation de solides combustibles carbonés ou organiques en présence d'un réactif gazeux et produisant des cendres ou du gaz de synthèse, après une étape de liquéfaction des enrobés bitumés ;
- niveau de maturité de cette filière nettement moindre que celui des deux autres.

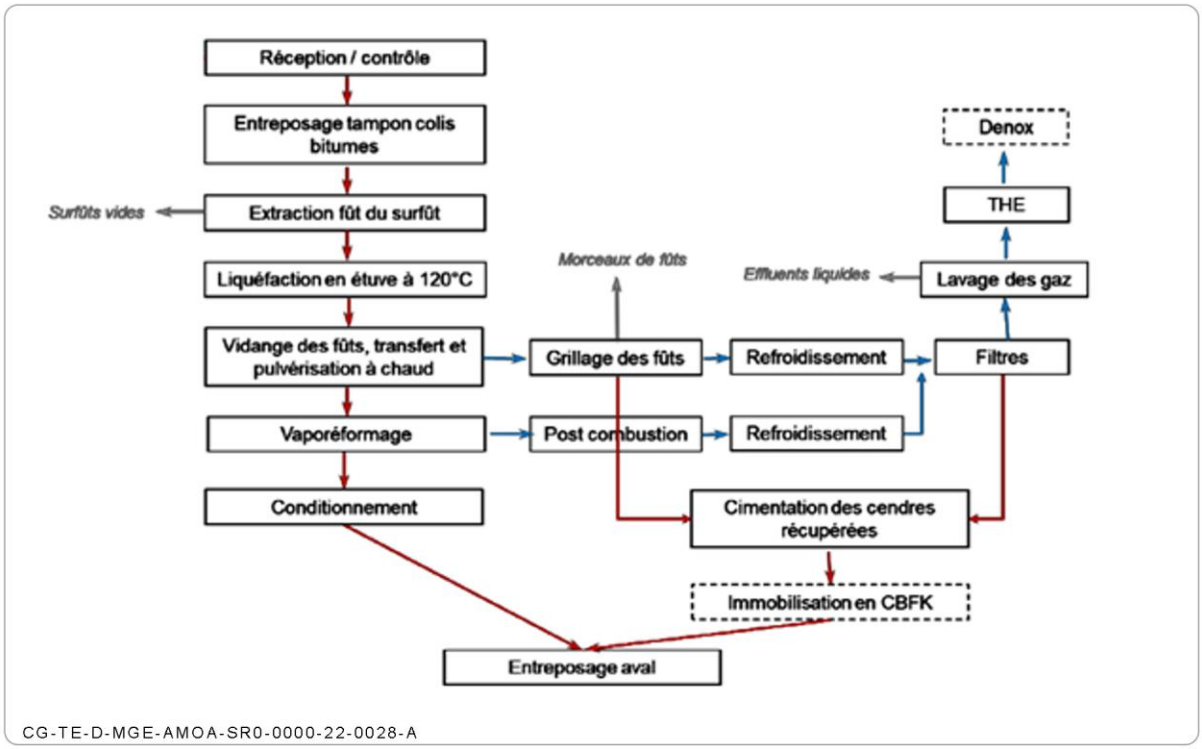


Figure Annexe 2-3 Diagramme fonctionnel du procédé de la filière 3 de traitement des déchets bitumés

Annexe 3 Les impacts radiologiques sur le public et en termes de pollution des sols du scénario d'emballement postulé de déchets bitumés

3.1 Les impacts radiologiques

Les conséquences radiologiques sont évaluées à l'aide de la plateforme CERES®.

Les résultats obtenus montrent que les doses absorbées par les adultes sont plus importantes que celles absorbées par les enfants.

Pour rappel, pour les situations accidentelles les plus sévères, les impacts radiologiques au public sont estimés afin d'évaluer les besoins de mesures de protection à court terme. Dans ces conditions, les estimations sont effectuées en tenant compte d'une durée d'exposition de 24 heures. Les évaluations sont confrontées à l'objectif de 10 mSv pour le public.

Le tableau et la figure suivants montrent que la dose maximale sur 24 heures reçue par le public est de l'ordre de 0,7 mSv à Bure et reste inférieure à 0,75 mSv autour de la zone puits, pour un objectif de protection fixé à 10 mSv. Cet accident ne nécessite donc pas de mesure de protection du public dans le temps et dans l'espace de type mise à l'abri.

Tableau Annexe 3-1 Dose maximale à 24 heures pour l'adulte en conditions météorologiques les plus défavorables autour de la zone puits, pour le scénario d'emballement postulé de déchets bitumés

Distance au point de rejet (m)	500	1000	2000 (Bure : 2120)	3000	4000	5000	7000	10000	13000
Dose à 24 h (mSv)	0,34	0,48	0,67	0,72	0,75	0,65	0,41	0,22	0,13

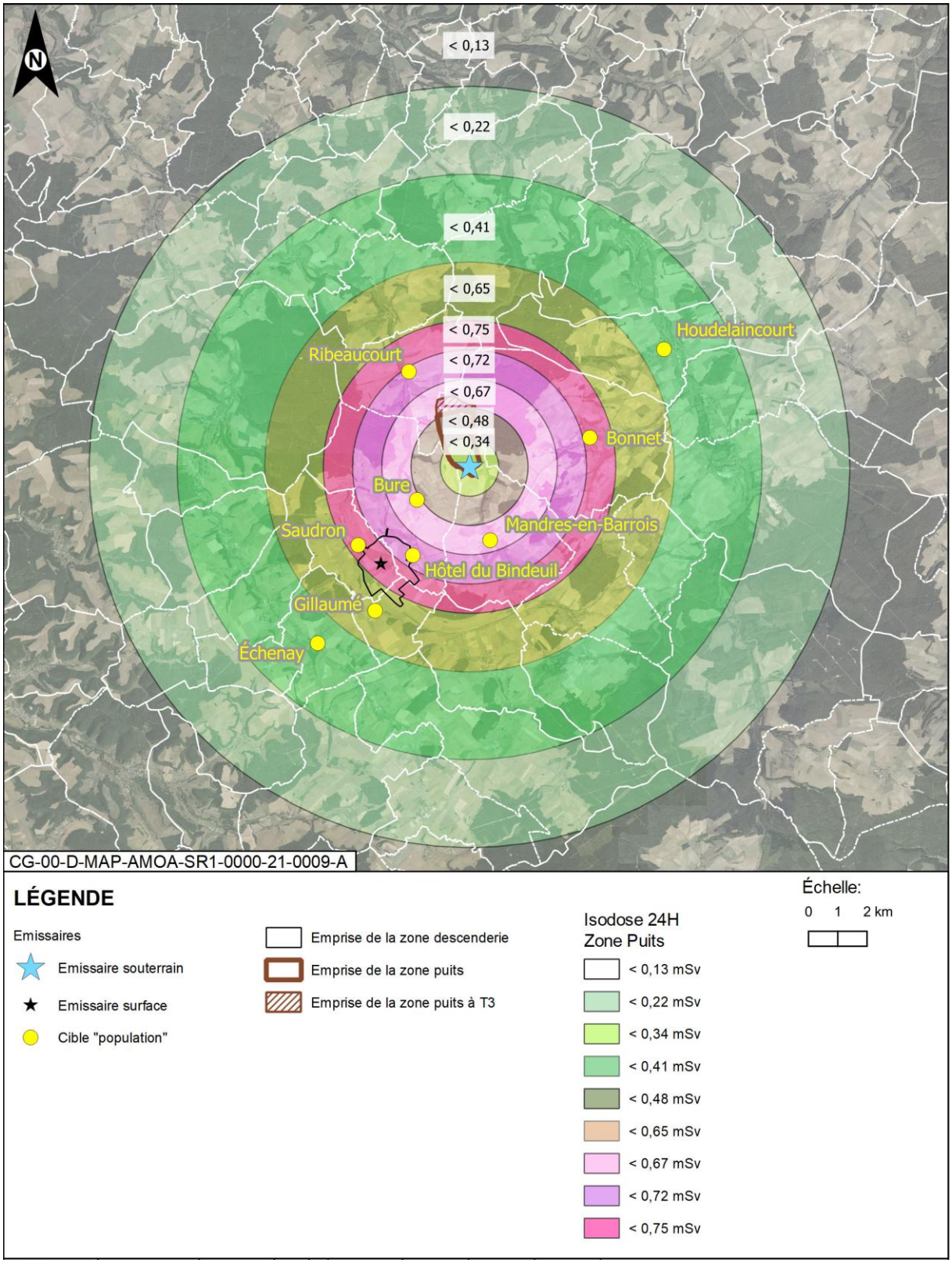


Figure Annexe 3-1 *Doses maximales autour de la zone puits pour l'adulte pour une durée d'exposition de 24 heures, pour le scénario d'emballement postulé de déchets bitumés*

3.2 Les impacts en termes de pollution radiologique et chimique des sols

3.2.1 Les dépôts surfaciques au sol

L'accident enveloppe conduisant aux doses les plus importantes autour de la zone puits est le même que celui décrit au chapitre précédent. La famille de colis de déchets retenue est la même ; elle conduit aux concentrations en émetteurs alpha, béta et gamma les plus importants. Les conditions météorologiques les plus pénalisantes sont toujours le cas F3.

Le tableau montre la concentration maximale en émetteurs alpha et en émetteurs bêta gamma à un an à plusieurs distances autour de la zone puits dans les conditions météorologiques les plus défavorables.

Tableau Annexe 3-2 Concentration maximale dans le sol à un an en Bq/kg autour de la zone puits, pour le scénario d'emballement postulé de déchets bitumés

Distance	500 m	1 000 m	2 000 m	3 000 m	4 000 m	5 000 m	Radionucléides contributeurs
Émetteurs alpha	0,028	0,23	0,47	0,51	0,53	0,46	Am241, Pu239
Émetteurs bêta et gamma	56	453	944	1010	1060	925	Cs137, Sr90

3.2.2 Les impacts sur les produits agroalimentaires

Les salades sont considérées comme un végétal pénalisant du fait de sa surface foliaire importante pouvant capter la radioactivité dans l'air.

L'évaluation de l'impact sur la contamination des salades est comparée aux limites de commercialisation Euratom.

Le tableau ci-après restitue la contamination des salades à différentes distances autour de la zone puits à un an (nouveau cycle végétatif) et la limite de commercialisation associée.

Tableau Annexe 3-3 Contamination des salades à un an en Bq/kg autour de la zone puits, pour le scénario d'emballement postulé de déchets bitumés

	500 m	1 000 m	2 000 m	3 000 m	4 000 m	5 000 m	Limite de commercialisation Euratom
Isotopes de périodes supérieures à 10 jours (sauf H3, C14 et K40)	7,93	64,1	134	144	150	131	1 250
Isotopes du plutonium et transplutoniens émetteurs alpha	$5{,}13.10^{-7}$	$4{,}15.10^{-6}$	$8{,}64.10^{-6}$	$9{,}29.10^{-6}$	$9{,}71.10^{-6}$	$8{,}47.10^{-6}$	80
Isotopes du strontium	1,88	15,2	31,7	34,1	35,7	31,1	750

L'ensemble des valeurs de contamination des salades à un an sont inférieures aux limites de commercialisation Euratom.

TABLEAU DE TRAÇABILITÉ DES PRINCIPALES ÉVOLUTIONS

Le tableau suivant précise les paragraphes qui présentent des évolutions ainsi que leur origine qui peut être de différente nature :

- évolution réglementaire : mise en cohérence avec les évolutions de réglementation post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- instruction technique avec l'ASNR : intégration de précisions apportées à l'ASNR en cours d'instruction technique en lien avec le contenu du dossier de DAC ;
- cohérence dossier : mise en cohérence entre pièces du dossier de DAC ;
- cohérence DR0 : mise en cohérence avec le dossier DR0 déposé post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence dossier de chiffrage : mise en cohérence avec le dossier de chiffrage déposé post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence dossiers PNGMDR : mise en cohérence avec les dossiers en réponse au PNGMDR déposés post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence politique énergétique : mise à jour de l'inventaire de réserve et des études de sûreté associées pour tenir compte des évolutions de politique énergétique. Ces éléments ont été communiqués à l'ASNR dans le cadre de l'instruction technique ;
- cohérence planning : intégration de la mise à jour de la date de mise en service annoncée post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence conditionnement : mise en cohérence avec les évolutions de conditionnement des colis primaires annoncées par les producteurs post-dépôt initial du dossier de DAC.

Paragraphe actualisé		Actualisation liée à								
		Évolution réglementaire	Instruction technique avec l'ASNR	Cohérence dossier	Cohérence DR0	Cohérence dossier de chiffrage	Cohérence dossiers PNGMDR	Cohérence politique énergétique	Cohérence planning	Cohérence conditionnement
1.1	Des évolutions du conditionnement de certaines familles de déchets	X								
2.1.2.1	Le déploiement progressif des ouvrages en surface			X						

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 2-1	Illustration de l'implantation des ouvrages de surface et en particulier des futures constructions ET-H et EP1	17
Figure 4-1	Schéma de principe d'un conteneur de stockage renforcé contenant des déchets bitumés en l'état (CS4.1)	46
Figure 4-2	Schéma de principe d'un colis de stockage de déchets bitumés en l'état à cinq logements (CS4.2)	47
Figure 4-3	Illustration de la section de l'alvéole dédié au stockage en l'état des colis de déchets bitumés et mis en conteneur renforcé vis-à-vis de l'incendie	48
Figure 4-6	Illustration du système de verrouillage, vis (conteneur) et griffe (palonnier) pour le stockage en l'état de colis de déchets bitumés mis en conteneur de stockage renforcé vis-à-vis de l'incendie	51
Figure 4-9	Schéma de principe du robot	53
Figure 4-10	Schéma de principe d'implantation de la rampe d'aspersion d'eau dans la zone d'isolement, dans un alvéole dédié au stockage en l'état des colis de déchets bituminés et mis en conteneur renforcé vis-à-vis de l'incendie	54
Figure 4-11	Courbes de feu du scénario court (à gauche) et du scénario long (à droite) d'incendie en cellule de manutention	61
Figure 4-12	Courbes de température des éléments intérieurs des colis CS4 sous les sollicitations du scénario long (à gauche) et du scénario court (à droite) en cellule de manutention	62
Figure 4-13	Illustration des champs de températures des colis de déchets bitumés soumis à différents scénarios d'incendie (scénario 1 = scénario court et scénario 2 = scénario long en cellule de manutention, scénario 3 en partie utile de l'alvéole)	63
Figure 4-14	Illustration du scénario extrême d'emballement d'un colis de déchets bitumés dans un conteneur	65
Figure 4-15	Courbe incendie maximale appliquée pendant huit heures sur le colis de déchets bitumés stockés en l'état, pour le scénario d'emballement postulé sur les colis adjacents	68
Figure Annexe 2-1	Diagramme fonctionnel du procédé de la filière 1 de traitement des déchets bitumés	74

Figure Annexe 2-2 Diagramme fonctionnel du procédé de la filière 2 de traitement des déchets bitumés 75
Figure Annexe 2-3 Diagramme fonctionnel du procédé de la filière 3 de traitement des déchets bitumés 76
Figure Annexe 3-1 Doses maximales autour de la zone puits pour l'adulte pour une durée d'exposition de 24 heures, pour le scénario d'emballement postulé de déchets bitumés 78

Tableaux

Tableau 4-1 Inventaire en colis de déchets bitumés 41
Tableau 4-2 Les dispositions de conception associées aux deux modes de stockage des colis de déchets bitumés 43
Tableau 4-3 Synthèse des températures maximales évaluées au niveau des colis de déchets bitumés pour les scénarios d'incendie en cellule de manutention et en alvéole de stockage de colis de déchets bitumés 63

Tableau Annexe 3-1 Dose maximale à 24 heures pour l'adulte en conditions météorologiques les plus défavorables autour de la zone puits, pour le scénario d'emballement postulé de déchets bitumés 77
Tableau Annexe 3-2 Concentration maximale dans le sol à un an en Bq/kg autour de la zone puits, pour le scénario d'emballement postulé de déchets bitumés 79
Tableau Annexe 3-3 Contamination des salades à un an en Bq/kg autour de la zone puits, pour le scénario d'emballement postulé de déchets bitumés 79

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 13 - Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-PDG-AMOA-OBS-0000-19-0001.

2 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 (2026). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-CS0-0000-20-0002.

3 Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture (DOS-AF). Andra (2016). Document N°CGTEDNTEAMOASR20000150062. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-apres-fermeture_0.pdf.

4 Dossier d'options de sûreté - Partie exploitation (DOS-Expl). Andra (2016). Document N°CGTEDNTEAMOASR10000150060. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-exploitation.pdf.

5 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 19 - Version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-SPE-AMOA-SR0-0000-19-0040.

6 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 16 - Plan directeur de l'exploitation. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SDR-0000-19-0001.

7 Décision du 21 février 2020 consécutive au débat public dans le cadre de la préparation de la cinquième édition du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020). Journal officiel de la République française (JORF), N°TRER2005279S.

8 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification des choix d'architecture souterraine. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-AF0-0000-19-0001.

9 Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo. Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-LST-AMOA-TR0-0000-20-0001.

10 Avis IRSN n° 2017-00190 - Avis relatif au dossier « Projet Cigéo - Dossier d'Options de Sûreté ». Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2017). N°2017-00190. 9 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/expertise/avis/2017/Documents/juin/Avis-IRSN-2017-00190.pdf.

11 Projet de stockage Cigéo - Examen du Dossier d'options de sûreté - Tome 2. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2017). N°IRSN 2017-00013. 209 p.

12 Avis et recommandations relatif au dossier d'options de sûreté du projet Cigéo (réunion tenue à Montrouge le 18/05/2017 et le 19/05/2017). Groupe permanent d'experts pour les déchets (GPD); Groupe permanent d'experts pour les laboratoires et les usines (2017). N°GPU-GPD-2017-051718. 5 p.

13 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.

14 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.

15 Revue externe sur la gestion des déchets bitumés : rapport final. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2019). 97 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/00-Publications/Rapport-final-revue-dechets-bitumes?

16 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 (JORF), N°DEVR1635310A.

17 Lettre CODEP-DRC-2019-005828 du 28 mai 2019 relative à l'étude PNGMDR 2016-2018 : comportement physico-chimique et thermique des colis de déchets bitumés en stockage. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2019). N°CODEP-DRC-2019-005828. 11 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/00-PNGMDR/PNGMDR-2016-2018/Courrier-dechets-bitumes-ANDRA.

18 Lettre CODEP-DRC-2021-027897 du 18 juin 2021 sur l'étude PNGMDR 2016-2018 : analyse de l'impact des résultats des études relatives au comportement des colis de déchets bitumés sur leurs conditions d'accueil dans Cigéo. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2021). N°CODEP-DRC-2021-027897. 8 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/00-PNGMDR/PNGMDR-2016-2018/Courrier-de-l-ASN-a-l-Andra-du-18-juin-2021-concernant-l-analyse-de-l-impact-des-resultats-des-etudes-relatives-au-comportement-des-colis-de-dechets-bitumes-sur-leurs-conditions-d-accueil-dans-Cigeo.

19 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.

20 État d'avancement des travaux sur des scénarios prospectifs de traitement et conditionnement des déchets d'enrobés bitumineux (article 48.1 de l'arrêté PNGMDR 2016-2018). Commissariat à l'énergie atomique (CEA) (2018). N°MOA/Cab.AG/18-119. 77 p.

21 Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs 2016-2018 : évaluation comparée des différents modes de gestion envisagés pour les déchets bitumés. Commissariat à l'énergie atomique (CEA); Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra); Orano; Électricité de France (EDF) (2020). N°DVS-DRC-CRE-26817. 34 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/00-PNGMDR/Evaluation-comparee-des-differents-modes-de-gestion-envisages-pour-les-dechets-bitumes-CEA-EDF-Orano-Andra.

22 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 (2026). Document N°CG-TE-D-PDD-AMOA-SDR-0000-19-0002.

23 Stockage en l'état des fûts de déchets bitumés dans Cigéo : maîtrise des risques et principes d'évolution et de conception. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-NSY-AMOA-SR1-0000-18-0006. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/00-PNGMDR/Stockage-en-l-etat-des-futs-de-dechets-bitumes-dans-Cigeo.

24 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification de la conception des alvéoles dédiés au stockage des colis de déchet bitumés mis en conteneur renforcé. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-MT0-0000-20-0017.

25 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Note d'analyse des risques liés à l'incendie en zone nucléaire. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-ERQ-AMOA-SR0-0000-20-0010.

26 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification de la conception du process nucléaire souterrain. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-MT0-0000-19-0032.

27 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification de la conception du conteneur de stockage des colis MA-VL. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-CS0-0000-19-0003.

28 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Dossier de justification de la conception de l'alvéole MA-VL. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-DJC-AMOA-ASU-0000-19-0045.

29 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Liste des EIP et exigences définies. Andra (2025). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-19-0045.

30 Hulot, N., Chevet, P.F. Courrier ASN/DGEC du 13 juin 2018 à M. Fournier pour organisation revue externe sur la gestion des déchets bitumés. Autorité de sûreté nucléaire (ASN); Ministère de la Transition écologique et solidaire (2018). 2 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/00-Publications/Mandat-Christophe-Fournier-revue-bitume?

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS
1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
www.andra.fr

© Andra • 2026 • Conception-réalisation : www.kazoar.fr • Crédit illustration : Andra