

# Rapport du CEA au titre de l'article 47 du décret portant les prescriptions du PNGMDR 2016-2018

30 Juin 2018

## Table des matières

1.	Contexte .....	4
1.1	Objet : demande PNGMDR.....	4
1.2	Cadre réglementaire.....	4
1.3	Exclusions techniques.....	5
1.4	Connaissance des déchets bitumés.....	6
1.4.1	Contexte et historique.....	6
1.4.2	Maitrise du risque incendie.....	6
2	Rappels des programmes de gestions des déchets et des échéances plausibles.....	8
2.1	Programme Industriel de Gestion des Déchets (PIGD) pour Cigéo.....	8
2.2	Les hypothèses de chroniques de livraison au stockage FAVL.....	8
2.3	Horizon temporel commun aux deux projets de stockage FAVL et Cigéo.....	8
3	Rappels sur les emballages de transport existants .....	9
3.1	Les hypothèses de transports de colis de déchets bitumés depuis Marcoule vers un stockage FAVL.....	9
3.2	Les hypothèses du PIGD pour Cigéo.....	10
3.2.1	Les modes de transport et d'exploitation des emballages vers Cigéo.....	10
3.2.2	Rappel : cas des colis de déchets à expédier depuis les sites du CEA.....	10
3.3	Schéma d'évacuation des colis depuis les installations d'entreposage jusqu'au centre de stockage.....	12
4	Part des colis transportable en IP2 : classement des FEB au regard des critères de la réglementation transport.....	12
4.1	Classement des FEB en 2035 au regard des critères de la réglementation transport.....	13
4.1.1	Autres optimisations envisageables.....	14
4.1.2	Tableau détaillé des résultats de la classification transport des FEB en 2035.....	14
4.2	Transport sous « utilisation exclusive » .....	17
5	Transport IP2 : le retour d'expérience pluri-décennale des expéditions et transports depuis le site du CEA Marcoule .....	17
5.1	Les conteneurs bétonnés .....	17
5.2	REX des transports actuels depuis le site de Marcoule.....	20
5.2.1	Flux actuels et nouveaux agréments Andra .....	21
5.2.2	Exemples de transport et des équipements existants .....	22
6	Transports des colis de transport de type B : emballage générique.....	24
6.1	Application au cas des fûts d'enrobés bitume de Marcoule.....	25

6.2	Le critère thermique.....	25
6.2.1	Stabilité thermique des colis de boues bitumées .....	26
6.2.2	Résultats acquis.....	28
6.2.3	Conclusions en termes d'analyse de sûreté incendie des colis d'enrobés de boues bitumées 31	
6.2.4	Prise en compte des effets de l'irradiation interne sur le comportement en situation d'incendie d'un enrobé de boues bitumées.....	31
6.3	Conclusion sur la disponibilité à l'horizon 2045-2050 d'un modèle de colis de transport de type B adapté aux colis bitume de Marcoule.....	32
7	Recherche de l'optimum global dans la gestion des différentes filières .....	32
8	Conclusions.....	33
9	Références.....	34

## Liste des figures :

Figure 1	: Synoptique des expéditions des colis de déchets vers Cigéo.....	11
Figure 2	: Schéma logistique d'évacuation des colis du CEA depuis les installations d'entreposage jusqu'aux centres de stockage Andra : cas de Cigéo.....	12
Figure 3	: Configurations de calculs géométrie conservée et géométrie superposée.....	16
Figure 4	: Illustration coques cylindriques en béton fibre et des fibres métalliques du béton fibre....	18
Figure 5	: Illustration de quatre types de conteneurs cubiques bétonnés ou pré-bétonnés : le CBFK, le CBFK-B, le CS4 et le caisson pré-bétonné.....	19
Figure 6	: CBFK-B avec 4 sur-fûts inox de 380L EIP bloqués dans le CBFK-B.....	20
Figure 7	: Opérations industrielles actuelles de constitution de colis CBFK à Marcoule : Exemple pour 5 fûts de déchets radioactifs dont 1 à 3 peuvent être des fûts de déchets bitumés.....	20
Figure 8	: REX FEB stockés au CSA en CBFK.....	21
Figure 9	: Illustrations de la gestion opérationnelle actuelle : chargement et expédition des CBFK par l'installation CEA de Marcoule .....	22
Figure 10	: Illustrations du chargement et de l'expédition des CBFK par l'installation CEA de Marcoule .....	22
Figure 11	: Manutention, chargement pour transport avec table hydraulique électrifiée.....	23
Figure 12	: Illustration : manutention, chargement et transport standard .....	23
Figure 13	: Essais de chute d'un CBFK pour sa qualification IP2 .....	23
Figure 14	: Illustration : table hydraulique électrifiée du caisson de transport (voir photos) .....	24
Figure 15	: Critères de sûreté relatifs aux colis d'enrobés de boues bitumées .....	26
Figure 16	: Essais d'incendie d'un colis béton contenant 4 FEB à échelle 1 .....	27
Figure 17	: Montage expérimental de mesure des températures pour étude du comportement thermique d'enrobés à l'échelle de 2kg par chauffe externe graduelle (gauche). Chambre expérimentale du dispositif (droite).....	28

## 1. Contexte

### 1.1 Objet : demande PNGMDR

L'Arrêté du 23 février 2017 [1] 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 (PNGMDR) précise les demandes concernant la période 2016-2018 du plan triennal. Cet arrêté demande dans son TITRE III « GESTION À LONG TERME DES DÉCHETS RADIOACTIFS » par l'article 47 que : «*Pour le 30 juin 2018, le CEA et Areva remettent au ministre chargé de l'énergie, de la sûreté nucléaire et au ministre de la défense pour la partie CEA un rapport d'étude sur les modalités de transport des colis de déchets bitumés. L'ASN et l'ASND sont saisies pour avis sur ce rapport.*».

L'objet de la présente note est de présenter, pour le CEA, le cadre et les résultats d'études permettant de définir les modalités de transport des colis de déchets bitumés entreposés à Marcoule vers les stockages exploités ou étudiés par l'Andra. Pour cette étude, le CEA retient de manière prudente l'année 2035 comme échéance très optimiste et commune aux deux projets FAVL et Cigéo ce qui correspond, sans aléa, à la fin de la Phase Industrielle Pilote de Cigéo en 2036 [2] et à la fin de la séquence 2032-2036 indiquée par l'Andra pour la mise en actif au plus tôt d'un stockage FAVL [3]. L'hypothèse d'une échéance optimiste de mise en stockage d'un premier colis est pénalisante du point de vue de la sûreté et de la radioprotection compte tenu de la décroissance radioactive et du spectre radiologique des colis considérés.

### 1.2 Cadre réglementaire

Cette note présente les modalités de transport de tous les colis de bitumes de Marcoule, qu'ils soient de catégorie FAVL ou de catégorie MAVL. Aussi la preuve de leur transportabilité est apportée dans les deux scénarios : i) celui de deux stockages FAVL et MAVL distincts ou ii) celui où tous les colis seraient stockés à Cigéo, avec les colis MAVL dans l'inventaire de référence de Cigéo et les colis FAVL dans l'inventaire en réserve de Cigéo.

Il convient de rappeler l'existence d'un retour d'expérience industrielle de transport sur voie publique de colis d'enrobés de boues bitumées de catégorie FMA-VC, qui sont évacués depuis le site du CEA Marcoule vers le CSA, en colis de transport de type IP2.

L'inventaire de réserve de Cigéo est défini dans le code de l'environnement à l'article D.542-90 : «*L'inventaire à retenir par l'Andra pour les études et recherches conduites en vue de concevoir le centre de stockage prévu à l'article L.542-10-1 de ce même code comprend un inventaire de référence et un inventaire de réserve. L'inventaire de réserve prend en compte les incertitudes liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou à des évolutions de politique énergétique...*»

De plus, l'Andra, dans sa note [4] remise au titre de l'article 56 de l'arrêté précité [1] en mars 2017 a formulé sa «proposition de types et de quantités de déchets à inclure dans l'inventaire de réserve de Cigéo». Cette proposition inclut bien la totalité des bitumes FAVL de Marcoule et précise de plus que : «Néanmoins, la mise en œuvre des évolutions de conception nécessaires pour effectivement accueillir ces substances dans le centre de stockage, devra, le cas échéant, faire l'objet le moment venu de procédures d'autorisation adéquates selon le cadre réglementaire en vigueur».

En cela l'Andra confirme le présupposé de l'article n°40 de ce même arrêté [1] qui précise « [...] iv. L'intégration à titre conservatoire de certains déchets FA-VL dans [...] les réserves ([...], les déchets d'enrobés bitumineux FA-VL [non traités] et les déchets [...]) de l'inventaire de Cigéo».

Enfin, le CEA est conforté par l'analyse de l'Andra [5] remise à l'ASN en avril 2018, dans la note DISEF/DIR/18-0060 («Enjeux de sûreté après fermeture autour d'un concept de stockage à faible profondeur pour la gestion de déchets de type FAVL»). Cette note précise page 9, que : «La coupure radiologique entre enrobés bitumineux FA-VL et MA-VL résulte de l'histoire ; il s'agit de déchets aux mêmes caractéristiques, présentant un continuum en termes d'activité, celle-ci restant faible au regard des autres déchets MA-VL». Ce continuum avait déjà été analysé par l'Andra dans [10].

### 1.3 Exclusions techniques

Le cas des transports internes courants dans le périmètre de l'INBS CEA de Marcoule, tels qu'actuellement réalisés lors du désentreposage des colis de déchets bitumés des casemates (après dépose des fûts dans des sur-fûts inox) vers leur nouveau lieu d'entreposage, n'est pas considéré dans la présente note. En effet, ces opérations de transports internes sont autorisées par l'Autorité de Sûreté Nucléaire Défense, et se font à l'aide d'un emballage DC6, dont le modèle de colis est homologué sur le site de Marcoule. Ce modèle n'est toutefois pas déployé pour des transports sur voie publique.

Il en est de même pour les fûts d'enrobés bitumineux en cours de production qui font l'objet d'un transfert interne à l'installation STEL (Station de Traitement des Effluents Liquides de Marcoule) comprenant à la fois l'atelier de bitumage et la dernière casemate d'entreposage, ou d'un transfert vers l'atelier CDS pour leur conditionnement en colis agréés par l'Andra et expédiés au centre de stockage de l'Aube (CSA).

Par ailleurs, le cas du transport interne ou externe vers une (ou deux) hypothétique(s) future(s) usine(s) de traitement des bitumes n'est pas analysé compte tenu de l'absence de définition des éléments techniques dimensionnant un tel scénario (nature du traitement, flux objectifs, mode de conditionnement initial nécessaire au traitement, compatibilité des matériaux d'emballage, compléments de colisage, localisation des installations réceptrice, intérêt technico-économique, gain de sûreté, etc.).

De même, le transport des résidus d'un tel traitement hypothétique, conditionnés ou non, ne peut pour des raisons similaires être analysé à ce stade. Aussi, le traitement des enrobés bitumés amènerait à redéfinir les conditions de transport après traitement.

## 1.4 Connaissance des déchets bitumés

### 1.4.1 Contexte et historique

La France a produit au total 75 000 fûts de déchets bitumés, pour la plupart en fûts de 220 litres, depuis les années 1960. 62 000 fûts se trouvent sur l'usine de Marcoule, 13 000 sur celle de la Hague. Les deux exploitants Orano Cycle et CEA continuent à en produire en toute sûreté sous autorisation des Autorités de Sûreté Nucléaire – le CEA quelques dizaines par an, Orano Cycle une centaine environ. Le procédé de fabrication a évolué au cours du temps pour s'adapter aux natures d'effluents radioactifs produits par le traitement chimique de différents types de combustibles usés. Les caractéristiques radiochimiques des colis d'enrobés de boues bitumées sont établies dans des bornes de variation connues.

La question de l'acceptabilité des colis de déchets bitumés en stockage (surface, ou en profondeur) n'est pas nouvelle – les premiers débats au sein du CEA (entre le précurseur de l'ANDRA, celui de l'IRSN et l'exploitant) sur ce sujet datent du milieu des années 1980. Pour rendre maîtrisable sous l'angle de la sûreté le stockage de ces colis de déchets, des programmes de R&D ont été continuellement conduits. Sous l'angle du REX industriel de la mise en stockage, il convient de rappeler que plusieurs milliers de colis de déchets bitumés (4649 fûts) produits sur le centre CEA de Marcoule ont été transportés (transport routier) puis stockés en toute sûreté au centre de stockage de la Manche.

La question de l'incendie des bitumes en entreposage ou en stockage (et transport) a été régulièrement posée. Ces questions sont alimentées par les quelques incidents ou accidents graves survenus lors d'opérations de bitumage vers 180°C, et plus particulièrement lors des premières heures de refroidissement après coulée de l'enrobé dans le conteneur. L'un des scénarios incidentels est que le bitume reste bouillant à cœur alors que la périphérie devient solide, provoquant alors un effet d'auto-échauffement à cœur. Une fois refroidis, en situation d'entreposage ou en stockage, cette situation ne peut pas se produire. Les colis de déchets bitumés sont froids à cœur et il est nécessaire de les chauffer pendant plusieurs dizaines d'heures pour que la température au centre s'élève. Aucun incident n'est jamais survenu en entreposage ou en stockage sur des colis de déchets bitumés une fois refroidis, et cela sur une période de plus de 50 ans aussi bien en France qu'à l'international.

### 1.4.2 Maîtrise du risque incendie

Le CEA, avec l'ANDRA et les deux autres producteurs propriétaires des bitumes (EDF et Orano), a réalisé un plan d'expériences très poussé démontrant scientifiquement que le risque d'incendie en stockage était à exclure. Ce plan repose sur trois fondamentaux :

- a. une modélisation fine du comportement du bitume à la chaleur – modification de la viscosité, relâchement de chaleur / énergie
- b. une modélisation fine des mécanismes de propagation de la chaleur dans le colis de bitume ;
- c. une modélisation des propagations éventuelles de chaleur en cas d'incendie (scénario incidentel) dans le stockage.

Les premières conclusions de cette étude ont été validées par la CNE2 en 2015. Le CEA a complété sa démonstration avec des nouveaux éléments fin décembre 2017, suite à une instruction des dossiers remis au titre de la Commission de Sûreté des Laboratoires, Usines et Déchets (CSLUD) de juillet 2016 :

1/ les phénomènes d'auto-irradiation dans l'enrobé bitumineux ont peu d'impact sur ses propriétés thermiques intrinsèques puisque l'augmentation de la viscosité avec la dose intégrée reste faible au regard de la diminution de cette viscosité avec une augmentation de température ;

2/ les réactions exothermiques entre les sels co-précipités s'amorcent au-delà d'une certaine température – qui dépend de la composition de l'enrobé bitumineux. Si cette température seuil est localement dépassée, un auto-échauffement ne peut se produire que si la hausse de température associée est suffisante pour compenser les pertes de chaleur vers les parties plus froides du colis et vers l'extérieur. Les conditions d'un auto-échauffement dépendent donc essentiellement du profil de la sollicitation thermique extérieure qui conduit à l'élévation de la température à cœur de l'enrobé, de l'énergie et de la puissance instantanée délivrées par les réactions exothermiques.

3/ les températures seuil d'amorçage de réactions exothermiques, l'énergie dégagée et la puissance délivrée ont été déduites des mesures effectuées sur un domaine de composition représentatif des enrobés bitumineux. Le caractère représentatif repose sur deux éléments :

- environ 110 échantillons de composition chimique différente ont été fabriqués et caractérisés. Cet échantillonnage couvre les 5 périodes de fabrication des colis de bitume de Marcoule ;
- la démonstration faite (cf. point 1) que le vieillissement et l'irradiation du bitume ne modifient pas les propriétés thermiques de l'enrobé (au moins d'un ordre de grandeur inférieur aux variations induites par des variations de température).

Les résultats de microcalorimétrie et les calculs de transferts thermiques montrent que :

- une température extérieure inférieure à 150°C appliquée à l'extérieur du colis n'est pas suffisante pour démarrer des réactions exothermiques au sein de l'enrobé, même pour des expositions thermiques de durée infinie ; en effet en deçà de cette température de 150°, aucune réaction exothermique n'a été observée ; dans la gamme de températures 150°C à 200°C, des réactions exothermiques peuvent avoir lieu. Dans ces conditions, les puissances thermiques mises en jeu sont cependant très faibles, ce qui permet de garantir l'absence d'un auto-échauffement du colis d'enrobé, quelle que soit la composition chimique de l'ensemble des 5 domaines d'enrobés produits de Marcoule, couverts par les plans d'expériences ;
- une sollicitation thermique externe et extrême, maintenue à 180°C sur l'ensemble du volume du colis durant 24 heures ne conduit pas à un auto-échauffement du colis.

Le CEA considère ainsi avoir répondu aux questions posées sur la représentativité des essais par rapport à la variabilité de la composition chimique des enrobés bitumineux produits à Marcoule.

Même en admettant l'hypothèse d'une auto-inflammation d'un colis particulier, les calculs effectués par le CEA et les expériences menées montrent que la configuration des fûts en stockage placés dans des conteneurs béton fermés hermétiquement (contenant 4 fûts de bitume, séparés par des lames d'air des conteneurs voisins) garantit la non-propagation d'un éventuel incendie par manque d'oxygène gazeux dans l'atmosphère entourant le fût concerné.

## 2 Rappels des programmes de gestions des déchets et des échéances plausibles

### 2.1 Programme Industriel de Gestion des Déchets (PIGD) pour Cigéo

Le Programme Industriel de Gestion des Déchets (PIGD) présente l'inventaire margé des colis de déchets, l'ordonnancement et les flux prévisionnels de livraison des colis vers le Centre industriel de stockage géologique de déchets radioactifs, Cigéo.

Il résulte d'un travail collaboratif et itératif entre les producteurs et l'Andra. Les données d'entrée concernant l'inventaire des colis de déchets et leurs modalités de livraison (transport) sont de la responsabilité des producteurs. Ces données d'entrée sont portées à la connaissance de l'Andra pour planifier et mettre en cohérence les moyens industriels à développer pour Cigéo.

Une première version du PIGD a été établie en janvier 2012 ; elle a servi de données d'entrée aux études d'esquisse du projet de stockage géologique menées par l'Andra. Cette version du PIGD a été évaluée par la Commission Nationale d'Evaluation et par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), avec son appui technique l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) et le Groupe permanent d'experts pour les déchets.

La version de janvier 2014 (indice D) a servi de donnée d'entrée aux études d'Avant-Projet Sommaire du projet Cigéo. La dernière version à date du PIGD (indice E [6]) a été publiée par les producteurs et l'Andra en novembre 2016 et sert actuellement de donnée d'entrée aux études d'Avant-Projet Détaillée en cours du projet Cigéo [6].

### 2.2 Les hypothèses de chroniques de livraison au stockage FAVL

Dans l'hypothèse de l'ouverture d'un stockage FAVL à l'horizon de 2032-2036 annoncée par l'Andra [3], et conformément à la conception envisagée par l'Andra d'un stockage modulaire et dont le déploiement serait progressif, avec plusieurs plateformes exploitées successivement [8], les colis de déchets bitumés de Marcoule pourraient ne pas être reçus dès la première tranche mise en service (plateforme n°3) reportant de l'ordre d'une décennie le début de leur stockage. A titre prospectif, une chronique volontariste de livraison des colis FAVL pourrait se résumer à environ 600 colis de 4 fûts par an sur une quinzaine d'années.

A titre de précaution, l'inventaire FAVL des fûts de déchets bitumés de Marcoule est intégralement pris en compte dans l'inventaire de réserve de Cigéo [4]. Cependant, dans l'hypothèse d'un traitement préalable des bitumes MAVL, opération qui n'est envisagée que pour maîtriser un risque incendie dans les galeries de Cigéo, il n'est pas statué à ce stade si les bitumes FAVL de Marcoule feraient l'objet des mêmes opérations de neutralisation.

### 2.3 Horizon temporel commun aux deux projets de stockage FAVL et Cigéo

En retenant l'année 2035 comme échéance commune aux deux projets de stockages FAVL et Cigéo de l'Andra, le CEA retient, de manière pénalisante, l'approche suivante du point de vue de la sûreté des transports et de la radioprotection, compte tenu du spectre radiologique des fûts d'enrobés bitumineux :

- Pour Cigéo, la fin de la Phase Industrielle Pilote de Cigéo en 2036 [2] est un objectif calendaire sans marge et sans aléa du planning de référence de l'Andra. De plus, suite à l'avis ASN sur le DOS Cigéo Andra, l'option privilégiée par l'ASN est la neutralisation de la réactivité des bitumes. En conséquence, la livraison pour stockage de colis de déchets bitumés de Marcoule est repoussée à l'horizon 2045 dans l'hypothèse d'une évolution de la conception des alvéoles MAVL pour stockage des colis de bitume de Marcoule par 4 en conteneur CS4 conçus par l'Andra.
  - ➔ Le planning actuel de désentreposage des colis de déchets bitumés des casemates de Marcoule prévoit la fin de telles opérations à l'horizon 2048 ;
  - ➔ Par ailleurs, toujours pour Cigéo, le planning de référence du projet prévoit la construction puis la mise à disposition de l'installation de déchargement des emballages à déchargements horizontaux au-delà de la Phase Industrielle Pilote, vers 2050. Or si des transports de type IP2 pour des colis de déchets bitumés de Marcoule devaient être mis en œuvre, ils nécessiteraient l'usage du bâtiment dédié aux déchargements horizontaux. A noter que cette restriction s'imposerait aussi pour l'ensemble des colis de déchets bitumés FAVL de l'inventaire en réserve de Cigéo.
- Pour un stockage FAVL, la fin de la séquence 2032-2036 indiquée par l'Andra pour la mise en actif au plus tôt d'un stockage FAVL [3] constitue comme précisé par l'Andra, une hypothèse optimiste d'échéance pour le stockage des premiers colis FAVL. Ceux-ci ne seraient, à ce stade des travaux Andra, pas des colis de déchets bitumés de Marcoule, mais des colis acceptables sur une première plate-forme. Les colis de Marcoule seraient réceptionnés pour stockage sur une plate-forme dédiée construite ultérieurement. La mise en œuvre pleinement opérationnelle de la troisième plate-forme, celle accessible aux colis de bitume n'est, là encore envisageable qu'à l'horizon 2050.

### 3 Rappels sur les emballages de transport existants

La France bénéficie d'un retour d'expérience important du point de vue de la sûreté des transports de substances radioactives. Elle est l'un des rares pays qui traite et recycle des combustibles usés, et qui opère l'ensemble des transports de substances radioactives issues de ce traitement, en particulier, les transports de combustibles usés, les transports de résidus issus de leur traitement et les transports de déchets solides ou liquides. Ce retour d'expérience est présenté dans le rapport [7].

#### 3.1 Les hypothèses de transports de colis de déchets bitumés depuis Marcoule vers un stockage FAVL

Le retour d'expérience des transports de colis depuis Marcoule vers le stockage CSA de l'Andra permet de conforter l'hypothèse du CEA de livrer au futur stockage FAVL, des colis définitifs cubiques, bétonnés ou pré-bétonnés et contenant 4 sur-fûts inox de type EIP et de 380 L, contenant chacun un fût de déchets bitumés. La description de ces modèles de colis de transport de type IP2, destinés au stockage direct, fait l'objet du chapitre 5.

### 3.2 Les hypothèses du PIGD pour Cigéo

Les producteurs ont identifié dans le PIGD [6] pour Cigéo des emballages de transport, leurs capacités et leurs modes de déchargement. Ces données constituent des données d'entrée pour les études de conception du projet Cigéo, notamment pour celles des installations de réception et de déchargement des emballages de transport sur Cigéo.

#### 3.2.1 Les modes de transport et d'exploitation des emballages vers Cigéo

Le projet Cigéo utilise, entre autres, deux types de données d'entrée structurantes précisées dans le Programme industriel pour les études de l'Andra :

- le mode de transport vers Cigéo :

Les principaux sites de production et d'entreposage des déchets disposent à proximité d'infrastructures permettant un transport routier et/ou ferroviaire.

- le mode d'exploitation de l'emballage qui est déterminant pour la conception des bâtiments nucléaires de Cigéo :

Un emballage peut en effet être exploité en position verticale « V » ou horizontale « H » selon le type (modèle d'emballage) et la configuration du site. Un même emballage pourra cependant être positionné verticalement ou horizontalement sur le véhicule de transport, ceci étant fonction de sa géométrie et du type de transport réalisé (route, rail, fleuve). Il faut donc noter que la mention « V » ou « H » ne concerne que la phase de déchargement des emballages à Cigéo et en particulier que le déchargement horizontal ne sera disponible qu'au-delà de 2050.

#### 3.2.2 Rappel : cas des colis de déchets à expédier depuis les sites du CEA

Concernant les expéditions vers Cigéo à partir des sites du CEA, comme indiqué dans le rapport PNGMDR de décembre 2017 [7].

- ➔ Pour le site de Marcoule, le scénario actuellement privilégié par le CEA consiste en un acheminement ferroviaire via une plateforme ferroviaire située sur ou dans les environs du site de Marcoule ; une autre option envisageable à ce stade de l'étude consiste en des solutions mixtes avec une étape de transport fluvial.
- ➔ Pour mémoire, concernant les autres sites concernés du CEA (Cadarache et Valduc) :
  - il en sera de même, concernant les colis de déchets expédiés depuis Cadarache, le CEA considère actuellement en hypothèse de référence, celle d'un acheminement ferroviaire soit via le terminal le plus proche, soit via une plateforme ferroviaire située sur ou dans les environs du site de Cadarache, et en variante, le CEA étudie des solutions intégrant une composante fluviale.

- les expéditions des colis de déchets depuis le site du CEA/Valduc seront effectuées par voie routière.  
Ces expéditions de déchets se feront selon le principe décrit dans le schéma suivant.

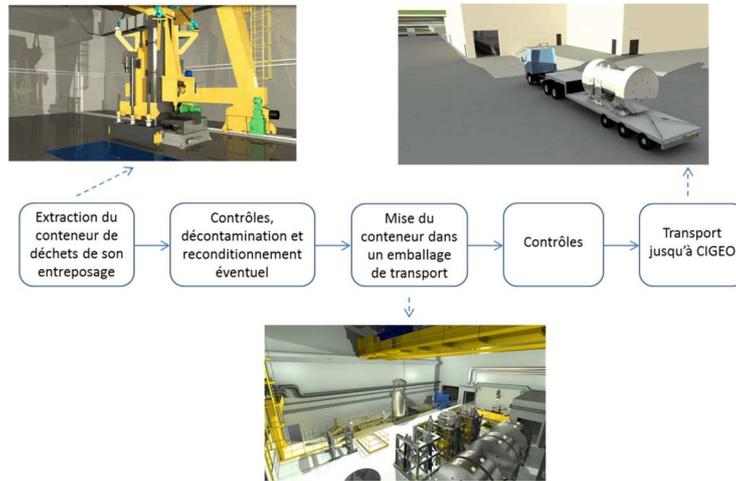


Figure 1 : Synoptique des expéditions des colis de déchets vers Cigéo

A l'arrivée à Cigéo, la prise en charge se fera selon le même principe, mais en sens inverse.

Comme indiqué dans le rapport [7], le CEA s'est aussi intéressé dans le cadre de ses études en variante aux installations de transbordement route/fleuve et fleuve/rail. Le Rhône et la Saône peuvent accueillir des bateaux de fort tonnage, de type « Automoteur rhénan » de 1 000 à 3 000 tonnes. Leur largeur peut aller jusqu'à 11,3 m et leur longueur jusqu'à 135m. Les gabarits pour le transport fluvial sont moins contraints que pour le transport routier ou ferroviaire, ce qui signifie qu'un colis au maximum des dimensions et tonnage acceptables sur route peut sans problème être transporté par voie fluviale. Le principe des installations de transbordement route/fleuve et fleuve/rail est proche de celui des installations de transbordement route/fer.

### 3.3 Schéma d'évacuation des colis depuis les installations d'entreposage jusqu'au centre de stockage

Le schéma ci-après illustre à date les options envisagées d'expéditions des colis depuis les sites. Il ne préjuge pas d'optimisations ultérieures des transports par un regroupement des flux issus des différents sites des producteurs.

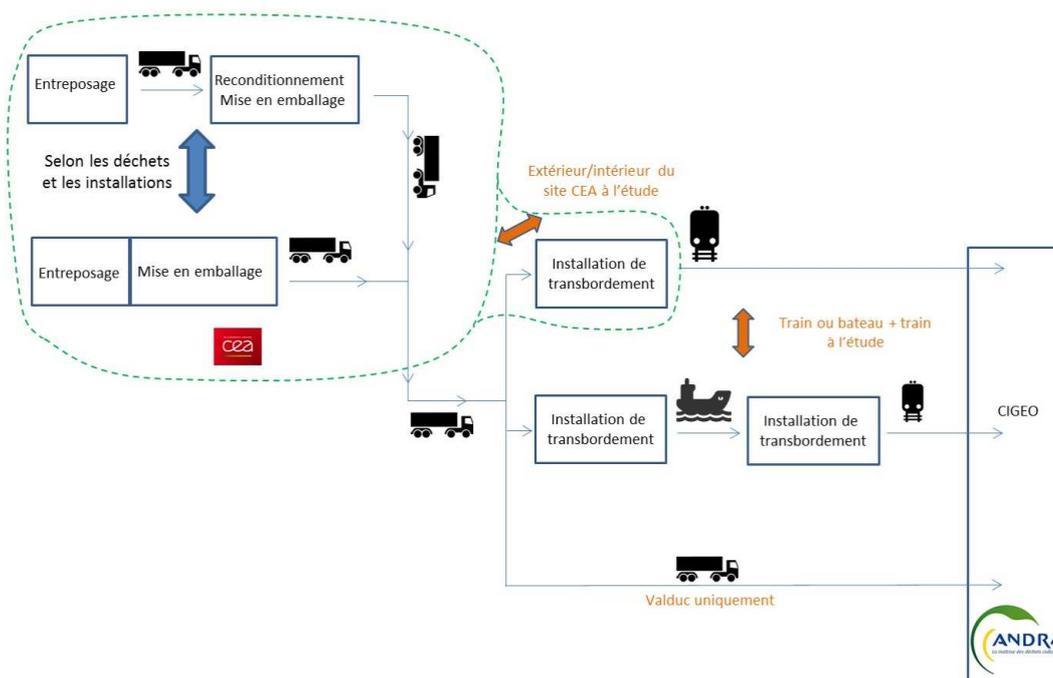


Figure 2 : Schéma logistique d'évacuation des colis du CEA depuis les installations d'entreposage jusqu'aux centres de stockage Andra : cas de Cigéo

## 4 Part des colis transportable en IP2 : classement des FEB au regard des critères de la réglementation transport

Le CEA avait réalisé en 2012 une étude de transportabilité des FEB en support aux inventaires des projets FAVL et Cigéo, en particulier pour conforter alors les conditionnements du PIGD (programme industriel de gestion des déchets). Cette étude a été reprise et actualisée en 2018 en référence à la réglementation transport [9].

#### 4.1 Classement des FEB en 2035 au regard des critères de la réglementation transport

L'étude 2018 réalisée par le CEA, considère le vieillissement du spectre radiologique des boues bitumées au 1er juin 2035, en tant qu'échéance au plus tôt pour prise en charge dans l'un des stockages Andra mis en service à cet horizon temporel.

L'étude est d'abord majorante en considérant la livraison de tous les colis à cette date optimiste (non margée : ni aléa, ni risques projet), alors que, compte tenu du nombre de colis concernés, même un planning ambitieux de livraisons s'étalera au moins sur une quinzaine d'années, quels que soient les différents scénarios d'exploitation des centres de stockage envisagés. De plus comme indiqué au §2.3, l'horizon 2050 est plus vraisemblable pour le démarrage des livraisons.

Sont ainsi identifiés environ 58 000 fûts d'enrobés bitume (FEB) qui pourraient être conditionnés dans des colis de type CBFK-B ou similaires, éventuellement blindés, et transportés en conteneurs ISO 20 pieds standards ou renforcés. Ces colis contenant 4 FEB seraient a minima au nombre de 14 500. Ces colis pourraient être similaires à ceux des agréments 12K et 12S présentés au §5.2.1.

- Plus précisément, 48 223 fûts<sup>1</sup> seront transportables avec des conteneurs ISO 20 pieds standards actuels en colis IP2, respectant les débits de dose (DdD) réglementaires de 2 mSv/h au contact et de 0,1 mSv/h à 2m,
- les autres fûts pouvant nécessiter l'utilisation de conteneurs IP2 renforcés pour respecter ce critère.
  - Parmi les 48 223 fûts, sont comptés les 525 fûts classés en fissile dans le tableau du §4.1.2 ci-dessous, car ce classement à titre de précaution provient de la comptabilisation de l'<sup>235</sup>U, bien qu'il présente un taux d'enrichissement inférieur à 1% (ratio <sup>235</sup>U/<sup>238</sup>U isotopes du spectre des déchets bitumés), et que dans la réglementation actuelle il est autorisé de ne pas le prendre en compte sous cette forme dans le calcul de la masse de matière fissile.
- Au total, 55 340 fûts sont transportables en IP2 en retenant les 7117 fûts dont le DdD est inférieur à 150 mGy/h au contact du fût (Cf. tableau §4.1.2 ci-dessous).

L'étude retient une autre hypothèse pénalisante, en considérant les critères de transportabilité pour chacun des 61 400 FEB pris individuellement. Ceci est simulé en considérant 4 fûts fictifs strictement identiques. Ainsi, il n'est pas tenu compte du gain qui résultera, en moyenne, du regroupement de quatre fûts différents au sein d'un même conteneur de type CBFK-B.

Les autres FEB qui ne seraient pas transportés ainsi, constituent l'inventaire maximal de colis qui seraient à transporter en emballage de type B fissile ou non, par exemple de type TN-833® moyennant un aménagement interne spécifique pour le transport de 4 sur-fûts individuels de 380 L, dit EIP. Dans ces conditions, ces transports pourraient concerner au maximum 900 trajets. Une optimisation (référence [6] PIGD : 6 FEB par emballage) des transports en développant un aménagement interne

<sup>1</sup> 48 223 fûts des quatre catégories du tableau §4.1.2 ci-dessous = 39082 + 7070 + 525 + 1546 (voir tableau)

pour 2 niveaux de 3 FEB, amènerait à 600 trajets. Le développement d'un concept alternatif plus capacitif avec 10 FEB par emballage avec le concepteur ROBATEL (concept RT-100®) permettrait de réduire ce nombre de trajets à moins de 400.

#### 4.1.1 Autres optimisations envisageables

Concernant le transport en IP2, une autre possibilité d'optimisation consisterait à concevoir le colis définitif de stockage avec :

- un béton haute densité pour constituer le conteneur CBFK-B ou le caisson pré-bétonné ;
- un blindage intégré, par exemple, par une plaque de plomb au sein du colis bétonné ;
- une boîte intermédiaire métallique ou une boîte intermédiaire renforcée (BIR) au sein du conteneur CBFK en se limitant à deux FEB en sur-conteneurs EIP inox de 380 L ;
- ce conteneur pourrait être classé IP2 et adapté pour respecter les critères de 2 mSv/h au contact et 0,1 mSv/h à 2 m, afin de ne pas être transporté dans un conteneur ISO 20'. Son transport sur voie publique pourrait être réalisé directement sur une semi-remorque plateau ou une savoyarde.

Enfin, dans certains cas, l'utilisation d'un conteneur IP2 renforcé permettrait aussi de transporter sur voie publique des colis définitifs de stockage en respectant l'ensemble des exigences réglementaires lors des transports comme lors des opérations de manutention et de stockage.

L'ensemble de ces optimisations pourront concerner l'ensemble des fûts LSA II non fissiles dont le DdD est inférieur à 300 mSv/h ainsi qu'une part des fûts non LSA II et non fissiles et des fûts LSA II fissiles du tableau ci-dessous.

Aussi, à l'horizon 2050, le nombre de transport en colis de type B sera très limité.

#### 4.1.2 Tableau détaillé des résultats de la classification transport des FEB en 2035

Les résultats de l'étude 2018 sont présentés en comparaison de ceux de l'étude de 2012 :

Catégories de colis	Nombres	Observations	nombres Etudes 2012*
Fûts avec Ded < 60mSv/h et activité alpha à 300 ans < 10,72GBq : nombre de fûts LSAII : critère massique (< 10 <sup>-4</sup> A2), non fissiles	39 082	**	29 705 (LSA II et LSA III)

Fûts avec Ded > 60mSv/h et activité alpha à 300 ans < 10,72GBq : nombre de fûts LSAII (critère massique (< 10-4 A2), non fissiles	0		1 252
Fûts avec Ded < 60mSv/h et activité alpha à 300 ans < 10,72GBq : nombre de fûts non LSAII (type B non fissile)	0		67
Fûts avec activité alpha à 300 ans > 10,72GBq : nombre de fûts LSAII et LSAIII (critère massique et Ded < 60mSv/h), non fissiles	7 070		11 066
Nombre de fûts LSAII non fissiles :			
60mSv/h < Ded < 150mSv/h	7 117***		4 655
150mSv/h < Ded < 300mSv/h	2 988		LSA II et LSA III et MF < 15 g avec U
300mSv/h < Ded	1 679		
Fûts avec activité alpha à 300 ans > 10,72GBq ou Ded > 60 mSv/h : nombre de fûts non LSAII = type B non fissiles	1 322	LSAIII < 45g >60 mSv/h	7 972
Fûts avec Ded < 60mSv/h et activité alpha à 300 ans < 10,72GBq : nombre de fûts LSAII fissiles	525	> 45 g	496
Fûts avec activité alpha à 300 ans > 10,72GBq : nombre de fûts LSAII - LSAIII (critère massique 2. 10-3 A2 et Ded < 60mSv/h), fissiles	1 546	> 45g	283 MF > 15g avec U
Fûts avec activité alpha à 300 ans > 10,72GBq ou Ded > 60 mSv/h : nombre de fûts non LSAII = type B fissiles	9	> 45g	44 MF > 15g avec U
<b>Total</b>	<b>61 338</b>		<b>55 540*</b>

Commentaires du tableau :

\* En 2012 :

➤ Les 55540 FEB considérés n'étaient que les FEB entreposés et produits avant 1994.

\*\* Le respect du critère de 10mSv/h à 3m est équivalent à respecter 2TBq en Cs137 (ou 780 mGy/h) pour 1 FEB ou 388 GBq (ou 150 mGy/h) dans le cas de 4 FEB / véhicule.

➤ Le critère de 60 mSv/h utilisé pour chaque fût (FEB) est plus pénalisant que le critère de l'ADR [9].

\*\*\* Seuls ces 7117 fûts respectent le critère de DdD de 0,1 mSv/h à 2 m de l'emballage en IP2 standard.

Le critère de DdD inférieur à 150 mSv/h est ramené à 120mSv/h toute incertitudes comprises (TIC)

Pour un transport à 4 fûts, il faut aussi tenir compte du critère ADR [9] de 10 mSv/h à 3 m de la matière nue : selon les hypothèses prises sur la répartition de la matière nue (bitume) soit superposée ou les uns derrière les autres (voir images), ce critère peut être atteint avec 377GBq/FEB au maximum, TIC.

Ces deux hypothèses sont présentées sur les figures ci-dessous : figure de gauche en géométrie conservée, ou en situation superposée (à droite) qui est un cas très pénalisant (perte totale du conteneur) :

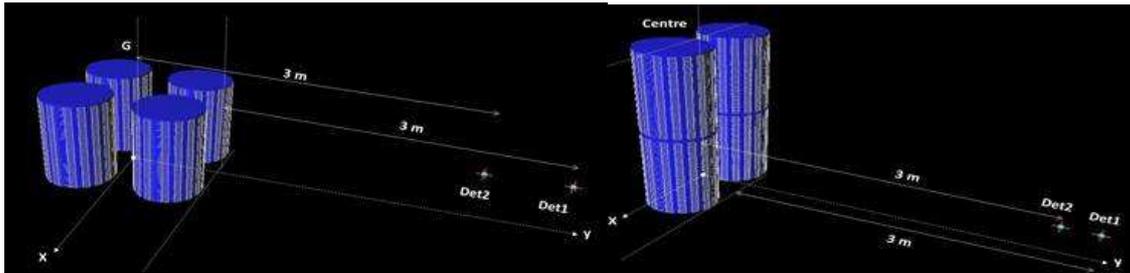


Figure 3 : Configurations de calculs géométrie conservée et géométrie superposée

Dans ce cas pénalisant, le max possible est de 388 GBq en Cs137 par FEB soit un DdD pseudo-contact de l'ordre de 150 mGy/h et qui donne environ 1 à 2 mGy/h au contact du CBFK-B :

Les 61 338 FEB considérés dans l'étude 2018 sont tous les FEB entreposés à Marcoule.

Les résultats détaillés sont :

- Le nombre de fûts d'enrobés bitumineux qui peuvent être regroupés par 4 en colis de type CBFK-B pour être transportés depuis Marcoule dès 2035, est de 55 340 FEB.
- Parmi les autres FEB, un transport en emballage de type B, constitue un schéma prudent, qui tient compte de critères très pénalisants évalués en phase initiale de conception, sur les limites en matière fissile, toute incertitude comprise, de l'emballage de transport de type TN-833®. A ce stade, le concepteur envisage les limites suivantes :
  - pour huit fûts, une limite par fûts de 8,5 gr en plutonium fissile ( $^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$ ) et de 6,5 gr en  $^{235}\text{U}$  ;
  - au total, une masse de 180 gr de matière fissile total pour l'emballage, répartie en 102 gr de Pu ( $^{239}\text{Pu}$  et  $^{241}\text{Pu}$ ) et 78 gr d' $^{235}\text{U}$  (enrichi à plus de 1%). Ces limites sont retenues pour 4 fûts de Marcoule dans le cadre d'une pré-étude confiée par le CEA au concepteur TNI de l'emballage TN-833®.
- La totalité des transports en emballage de type B concerne des colis MAVL à destination de Cigéo. Il n'y aura donc aucun transport de ce type au départ de Marcoule vers le futur stockage FAVL de l'Andra.

## 4.2 Transport sous « utilisation exclusive »

Pour un envoi en transport exclusif, l'extension à une limite de 10 mSv/h au contact du colis, nécessite aussi de respecter les critères suivants de l'ADR [9] :

- L'accès des personnes non autorisées dans l'enceinte est empêché dans les conditions de routine,
- Le colis est immobilisé dans l'enceinte dans les conditions de transport de routine,
- Il n'y a pas d'opération de chargement ou de déchargement entre le début et la fin de l'expédition :
  - le respect d'un critère maximum de 2 mSv/h en tout point des surfaces externes du véhicule,
  - le respect d'un critère maximum de 0,1 mSv/h à 2 m des surfaces latérales externes du camion.

Dans certains cas, des emballages adaptés pour des colis spécifiques à transporter seront utilisés (conteneurs IP2 avec des protections radiologiques complémentaires).

A noter que le critère de 100 A2/véhicule, qui pourrait être contraignant pour 4 des fûts les plus actifs, est toujours respecté par assemblage de fûts regroupés en tenant compte de cette contrainte. Les FEB qui, transportés par 4 sans assemblage ne respecteraient pas ce critère, sont : 157 FEB LSA II, 3049 FEB LSA III et 1286 type B, soit au total 4492 FEB.

## 5 Transport IP2 : le retour d'expérience pluri-décennale des expéditions et transports depuis le site du CEA Marcoule

### 5.1 Les conteneurs bétonnés

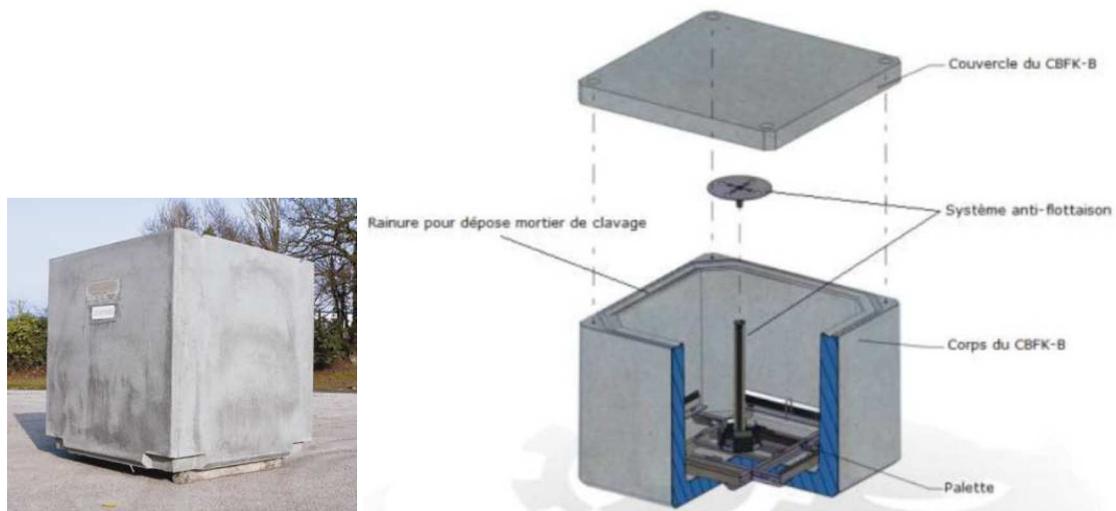
Des conteneurs en béton sont couramment utilisés pour conditionner les déchets radioactifs conformément aux spécifications d'acceptation pour leur stockage de l'Andra. La société TEMIS, filiale d'Orano, produit des conteneurs en béton fibré dont la formulation avec des fibres métalliques (Fibres Fibraflex en fonte amorphe, résistant à la corrosion y compris en milieu « salin ») et la mise en œuvre par moulage permettent de satisfaire aux exigences de confinement sur 300 ans nécessaires pour se conformer à la démonstration de sûreté du Centre de Stockage de l'Aube (CSA) de l'Andra.



Figure 4 : Illustration coques cylindriques en béton fibre et des fibres métalliques du béton fibre

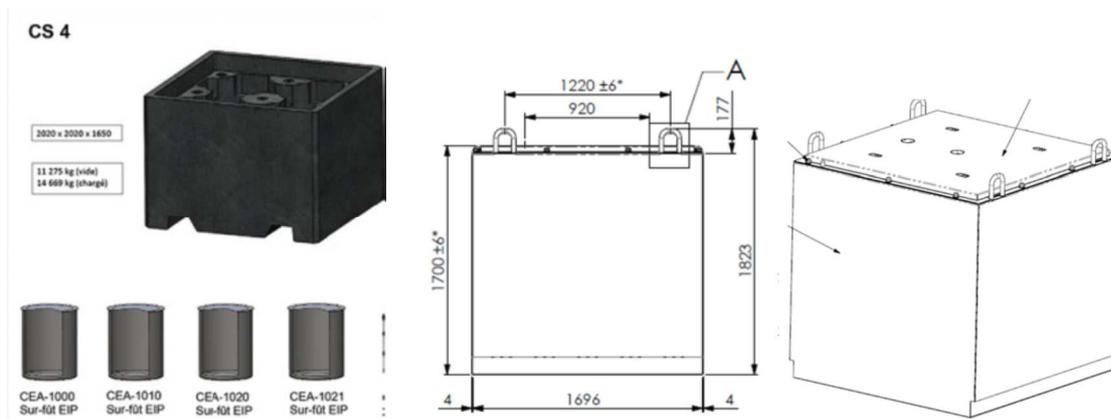
Ces conteneurs en béton fibre (CBF) sont cylindriques (coques CBF-C1, CBF-C2) ou cubiques (CBF-K). Le CBFK standard présente une version renforcée dont le couvercle est boulonné (CBFK-B). D'autres concepts de conteneurs pré-bétonnés dans une enveloppe métallique apportent les mêmes garanties de durabilité et de confinement pour des formulations de mortier agréé par l'Andra au regard de l'ensemble des critères spécifiés et des épreuves techniques définies par l'Andra.

Par ailleurs, dans le cadre des études et essais pour le projet Cigéo, l'Andra développe une gamme de conteneurs cubiques en béton armé permettant d'accueillir la grande variété de géométrie des colis MAVL de l'inventaire du PIGD [6]. Parmi ces conteneurs, l'Andra a dédié le modèle CS4 au conditionnement des fûts de déchets bitumés, avec une variante pour 4 sur-fûts EIP de 380L contenant chacun un fût d'enrobés bitumineux de Marcoule, et une variante contenant 5 fûts d'enrobés bitumineux de La Hague.



CBFK standard

CBFK-B



Modèle CS4 de conteneur Cigéo

Caisson métallique pré-bétonnés

Figure 5 : Illustration de quatre types de conteneurs cubiques bétonnés ou pré-bétonnés : le CBFK, le CBFK-B, le CS4 et le caisson pré-bétonné.

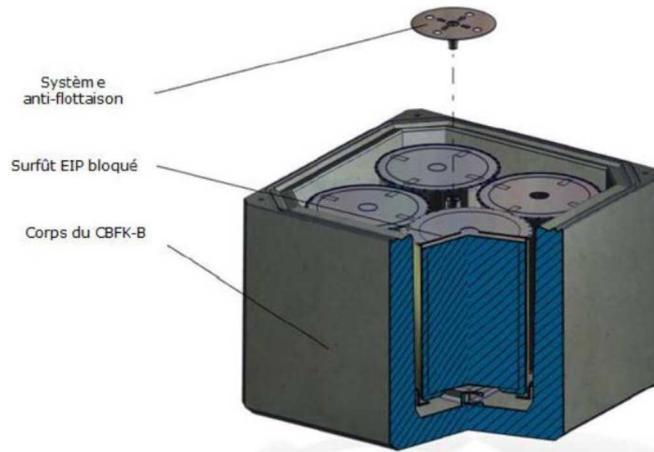


Figure 6 : CBFK-B avec 4 sur-fûts inox de 380L EIP bloqués dans le CBFK-B

## 5.2 REX des transports actuels depuis le site de Marcoule

Les transports en conteneurs CBFK, agréés IP2, de FEB QP produits à la STEL de Marcoule, permettent la livraison au CSA de l'Andra des colis FMA-VC agréés par l'Andra (agrément 12 G).



Figure 7 : Opérations industrielles actuelles de constitution de colis CBFK à Marcoule : Exemple pour 5 fûts de déchets radioactifs dont 1 à 3 peuvent être des fûts de déchets bitumés

La figure 7 ci-dessus illustre les opérations industrielles actuelles de constitution de colis CBFK dans l'installation de conditionnement des déchets solides (CDS) sur le centre CEA de Marcoule. L'exemple présenté concerne le conditionnement de 5 fûts de déchets radioactifs dont 1 à 3 peuvent être des fûts de déchets bitumés, les autres contenant des déchets technologiques hétérogènes. Les trois étapes principales sont :

1. introduction de fûts en CBFK,
2. immobilisation par injection d'un mortier et fermeture du CBFK, puis,
3. déplacement du colis pour entreposage le temps nécessaire au séchage du mortier.

### 5.2.1 Flux actuels et nouveaux agréments Andra

Pour mémoire, il est aussi rappelé que le stockage au CSM de 4649 fûts de déchets bitumés de Marcoule (produits entre 1966 et 1979) a été réalisé en toute sûreté, parmi le stockage d'environ 105 000 m<sup>3</sup> de déchets du CEA sur les 530 000 m<sup>3</sup> de déchets stockés au CSM.

Plus récemment, le processus dynamique d'autorisation au fur et à mesure des colis de déchets agréés au CSA a vu aboutir courant 2017 et début 2018 plusieurs dossiers d'agréments par l'Andra pour des colis similaires parmi lesquels on peut noter :

1. Notification par l'Andra des agréments :
  - Agrément 12K pour fûts de relargage conditionnés en conteneurs cubiques en béton-fibres métalliques boulonnés (CBFK-B) pour 4 sur-fûts EIP de 380L avec 4 fûts de relargage.
  - Agrément 12S – Fûts 380L produits par l'installation STEMA et conditionnés par 4 en conteneurs CBFK-B.
2. Maintenance des agréments :
  - Agrément père 12B - Déchets irradiants en BIR (boite intermédiaire renforcée) et en conteneur CBFK.
  - Agrément 12G - Fûts d'enrobés bitumineux et fûts de déchets technologiques hétérogènes immobilisés dans un conteneur CBFK.
3. Développement de nouveaux agréments : agrément de la famille de colis relative aux déchets hétérogènes immobilisés dans un caisson métallique 5 m<sup>3</sup> à enveloppe interne confinante.

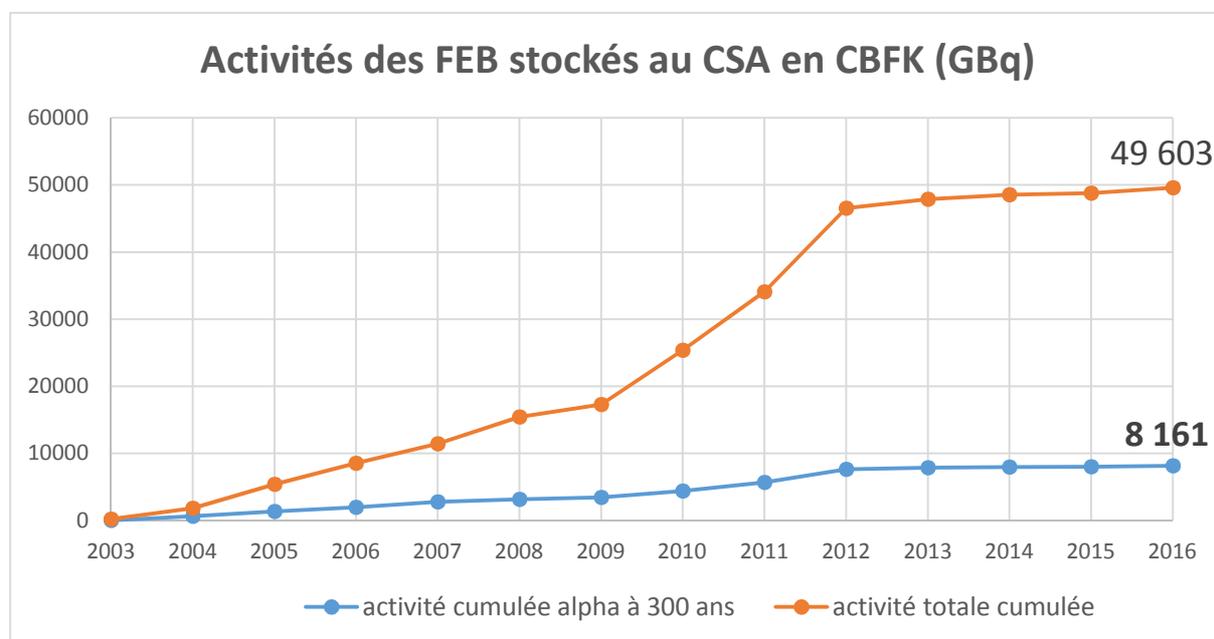


Figure 8 : REX FEB stockés au CSA en CBFK

A fin 2017, il est à noter qu'aucun écart lié aux fûts de déchets bitumés n'a été constaté en 15 années de livraisons au CSA de l'Andra pourtant soumis à un haut niveau de contrôle qualité colis. Les seuls constats concernent la problématique générique des coques béton, dont les CBFK, avec la présence

constatée de petites fissurations de dimensions proches de celles des tolérances spécifiées des discontinuités inévitables dans un matériau hétérogène.

En 2003, l'agrément initial de l'Andra accordait une autorisation initiale pour un seul fût inox de 200L d'enrobés bitumineux, produits à la STEL sous assurance qualité produit, par CBFK, avec 4 autres fûts de déchets non bitumés.

Après instruction d'une demande d'extension et prise en compte du retour d'expérience pour améliorer les pratiques, l'Andra a autorisé en 2007 le remplissage d'un CBFK avec 3 fûts d'enrobés bitumineux avec deux autres fûts contenant d'autres natures de déchets.

Ainsi, pendant les 10 dernières années, les colis CBFK ont été constitués avec de 1 à 3 fûts de déchets bitumés. Au total plus de 640 fûts de déchets bitumés de Marcoule ont été stockés au CSA à fin 2017.

### 5.2.2 Exemples de transport et des équipements existants



Figure 9 : Illustrations de la gestion opérationnelle actuelle : chargement et expédition des CBFK par l'installation CEA de Marcoule

Les opérations de manutention et de transport des colis considérés (colis cubiques de type colis bétons-fibres CBF, colis pré-bétonnés à enveloppes métalliques et colis cylindriques bétons) sont couramment mises en œuvre depuis des décennies et sont conformes aux normes récentes les plus strictes en matières de transport et manutention.



Figure 10 : Illustrations du chargement et de l'expédition des CBFK par l'installation CEA de Marcoule



Figure 11 : Maintenance, chargement pour transport avec table hydraulique électrifiée



Figure 12 : Illustration : maintenance, chargement et transport standard



Figure 13 : Essais de chute d'un CBFK pour sa qualification IP2

Des attestations de conformité au type IP2 des colis CBFK et CBFK-B en tant qu'emballage de transport pour des matières radioactives solides LSA-I ou LSA-II non fissiles ou fissiles exceptées (divers chargements : 4 fûts STEMA, 4 sur-fûts EIP 380L contenant des fûts de relargage ou contenant des FEB Fûts d'Enrobés Bitumes, 5 fûts de 220L dont 1 à 3 FEB Qualité Produits, etc.) sont délivrées pour les transports sur route effectués sous la responsabilité du CEA.

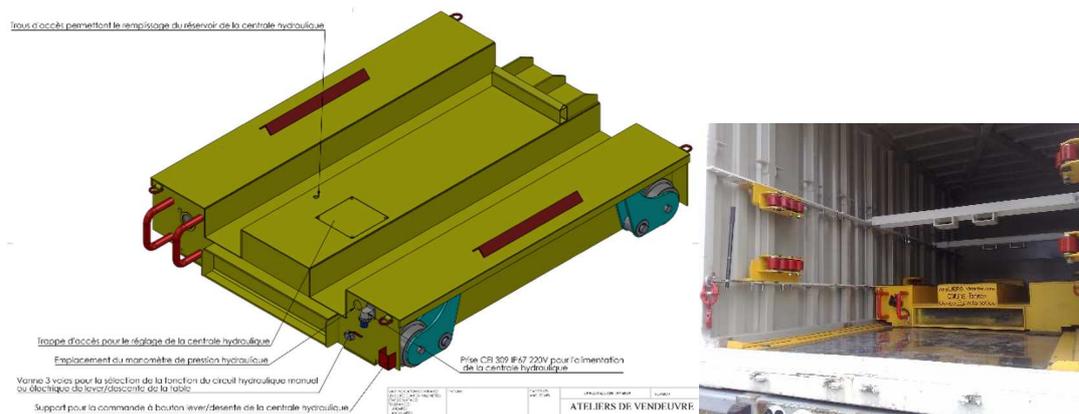


Figure 14 : Illustration : table hydraulique électrifiée du caisson de transport (voir photos)

Ces opérations standardisées de transports sont réalisées industriellement sans aucun incident significatif depuis des décennies. Les colis CBF constituent un standard industriel pour le conditionnement des déchets des grands producteurs français (EDF, Orano et CEA) et leur acheminement est maîtrisé pour le stockage au CSA de l'Andra.

On notera aussi que ce processus est mis en œuvre continuellement depuis de nombreuses années sous le contrôle permanent des deux autorités de sûreté nucléaire, civile et défense, chacune dans son domaine de prérogative :

- L'ASND autorisant le fonctionnement de l'atelier de conditionnement de ces colis (CDS) et la production des FEB à la STEL (tout comme l'ASN à La Hague), ainsi que les transports internes dans le périmètre INBS de Marcoule et les opérations d'entreposage en casemate 14 et dans les alvéoles EIP pour les FEB reprises ;
- L'ASN autorisant et contrôlant les transports de ces colis sur voie publique vers le CSA, les opérations de manutention et de gestion et de stockage au CSA en accord avec le rapport de sûreté.

## 6 Transports des colis de transport de type B : emballage générique

Le flux résiduel de colis MAVL depuis le CEA Marcoule concernera de l'ordre de quelques milliers à quelques centaines de fûts à l'horizon 2050. Le transport de ces colis, qui ne seraient pas éligibles à une solution robuste et économique du type IP2 exposée au chapitre précédent, nécessiterait la mise en œuvre d'un colis de type B. Les modèles de colis de ce type sont développés sur un marché international par des concepteurs spécialisés, et font l'objet d'un processus d'autorisation rigoureux et assez long.

L'un des concepts d'emballage, dont l'adaptation a été étudiée pour le transport des colis de déchets bitumés de Marcoule, est le TN-833® conçu par TN, filiale d'Orano Cycle (Ex-Areva). Ce concept a fait l'objet d'un avis positif du Groupe Permanent d'experts pour le Transport de matières radioactives et fissiles à usage civil, le 28 juin 2011. Cet avis est relatif à la conformité aux exigences applicables aux colis de type B(U) chargés de matières fissiles, pour le transport routier et ferroviaire, du modèle de colis TN-833®. Il porte sur la demande présentée par la société TN International en vue de la délivrance

d'un agrément pour le transport routier et ferroviaire du nouveau modèle de colis dénommé TN-833®. Le contenu défini pour ce modèle de colis est composé de fûts d'enrobés de déchets bitumés produits dans l'atelier STE3 de l'usine de retraitement de l'établissement Areva NC (devenu Orano Cycle) de La Hague (fûts « STE3 »).

Toutefois ce concept étudié par Orano pour ses propres besoins ne préjuge en rien du choix d'emballage qui sera opéré à l'avenir par le CEA. En effet dans le cadre de ses études de faisabilité, le CEA a étudié et défini d'autres alternatives avec d'autres concepteurs. Le CEA dispose ainsi d'un premier panorama du parc d'emballages nécessaire au respect des cadences du PIGD pour l'ensemble des natures de colis de déchets dont il est détenteur. Les concepts d'emballages les plus récents et jugés les plus pérennes pour les autorités ont été identifiés. Entre autres, un concept plus capacitif pour les FEB de Marcoule a été étudié par le CEA avec le concepteur ROBATEL (concept RT-100®).

## 6.1 Application au cas des fûts d'enrobés bitume de Marcoule

Les spécificités des FEB de Marcoule pour le transport en emballage de type B comparativement à celles de La Hague utilisées pour le développement du concept TN-833® sont les suivantes :

- Une masse de bitume réduite : le concept envisagé par le concepteur de l'emballage, pour le CEA concerne 4 fûts callés avec un aménagement interne spécifique (au lieu de 12 dans le cas étudié en GP pour Areva – devenu Orano Cycle) ;
- Un critère thermique plus élevé que celui de 100°C retenu en 2011 par la société TNI pour les bitumes STE3 de La Hague, puisque le CEA retient sur le fondement des études les plus récentes (période 2013-2018) un critère de sûreté de 180° C toute incertitude comprise pour les fûts de déchets bitumés à la STEL de Marcoule.

Dans le cas CEA, il y a donc trois facteurs favorables en 2018 :

- un aménagement interne avec 4 à 6 sur-fûts inox de 380 L contenant donc au total 4 à 6 fûts de 210 L pour Marcoule (remplissage moyen des fûts de 70% de boues bitumées en volume) à comparer aux 12 Colis primaires de 210 L de bitumes de La Hague (aménagement interne avec 2 niveaux de 6 fûts pour Orano La Hague) ;
- un critère de sûreté de 180°C résultants des travaux récents (2014-2018) du CEA, travaux publiés pour soutenir l'ensemble des analyses de sûreté des FEB Marcoule, lors des opérations de reprise, en transport interne en DC6, en entreposage dans les EIP, comme en transports externes puis en stockages ;
- une absence de réactivité thermique en dessous de 150°C pour les FEB produits à la STEL de Marcoule et une réactivité thermique détectable avec les outils de mesures micro-calorimétriques entre 150 et 200°C mais cependant sans impact en termes d'énergie d'auto-échauffement.

Ces deux derniers points font l'objet des paragraphes suivants.

## 6.2 Le critère thermique

Le critère thermique retenu par le CEA est de 180°C marge de sûreté comprise.

Le critère physique est de 200°C et une marge de sûreté de 20°C est retenue.

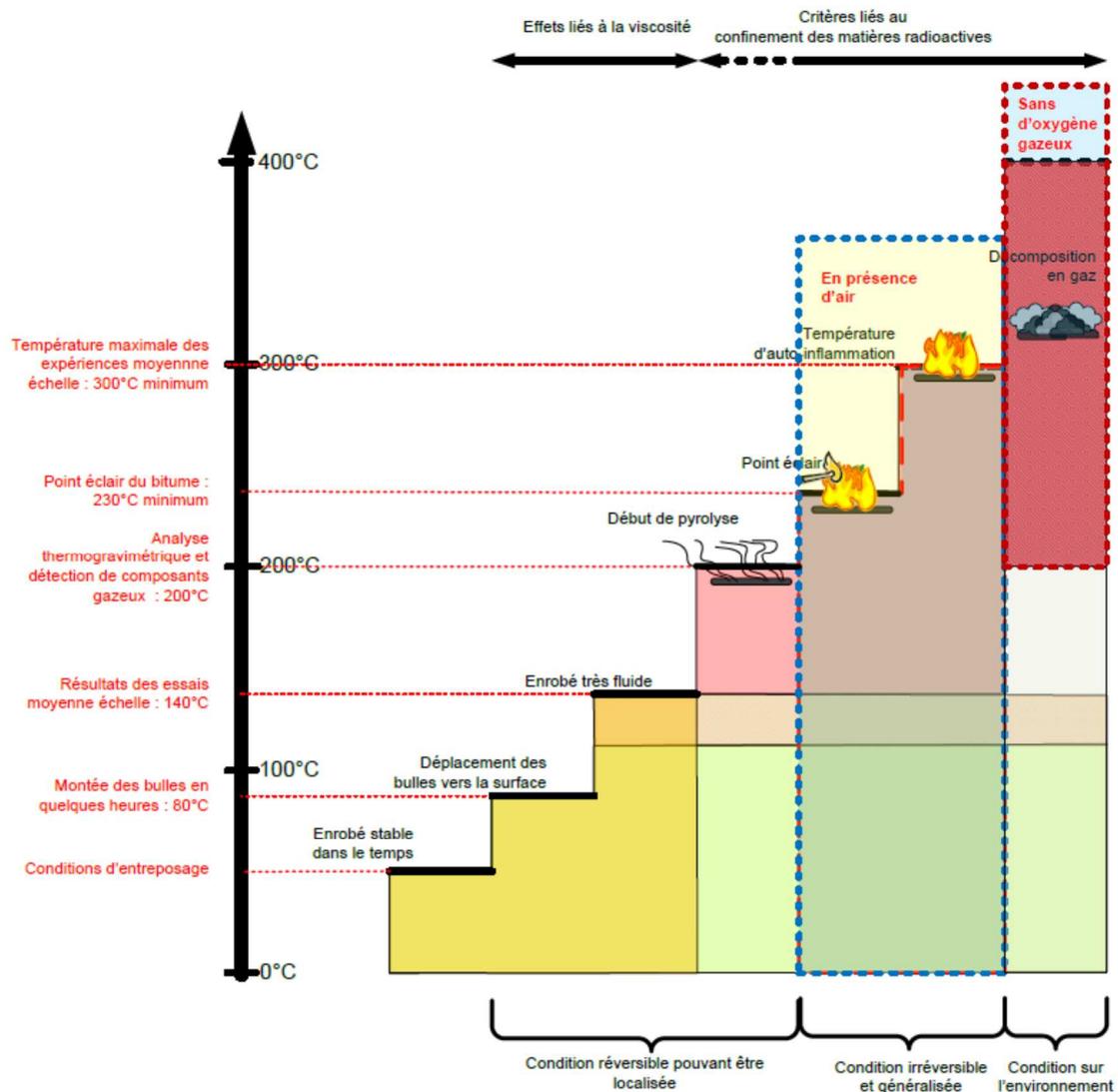


Figure 15 : Critères de sûreté relatifs aux colis d'enrobés de boues bitumées

### 6.2.1 Stabilité thermique des colis de boues bitumées

Un programme de recherche scientifique sur le comportement des colis d'enrobés de boues bitumées<sup>2</sup> a été réalisé pour démontrer les conditions d'une maîtrise du risque incendie lors de la phase réversible du stockage géologique. Ce programme a été construit suite aux demandes formulées en 2012 par la

<sup>2</sup> Cabinet du Haut-commissaire à l'énergie atomique- Rapport de mission : Le stockage souterrain des colis de déchets bitumés. 24 pages. Janvier 2014.

CNE2<sup>3</sup> et le Haut-Commissaire à l'Énergie Atomique, résultant d'interrogations de la part de l'Andra, de la DGEC, des autorités de sûreté nucléaires (ANS et ASND) et de l'IRSN.

Afin d'évaluer précisément les conséquences d'une agression thermique sur le colis bitume, trois types d'essai ont été réalisés. Ces essais tiennent compte de la configuration du colis de stockage et de la variabilité industrielle des formulations chimiques des enrobés de boues bitumées [14].

1. Quatre essais intégraux d'incendie réel ont été réalisés à l'échelle 1 sur des colis de boues bitumées de 250 kg chacun, placés dans le conteneur de stockage en béton de Cigéo. Les conditions aux limites appliquées sont plus élevées que celles requises par les normes ISO en vigueur pour la tenue au feu des infrastructures de génie civil et des bâtiments. L'objectif est de mesurer l'évolution thermique du système réel soumis à un incendie de référence enveloppe atteignant plus de 1000°C dans la durée de 2 heures, et générant une puissance thermique de 2 mégawatt. La représentativité des sollicitations retenues résulte de la reproduction de la configuration géométrique et physique de la zone souterraine de stockage du projet Cigéo.



Figure 16 : Essais d'incendie d'un colis béton contenant 4 FEB à échelle 1

2. Une vingtaine d'essais de sollicitations thermiques jusqu'à 300°C a été réalisée à l'échelle de quelques kilogrammes d'enrobés de boues bitumées, sans la présence du colis de stockage béton de Cigéo. L'objectif est double : clarifier le comportement thermique d'ensemble d'une part, établir les lois physiques de transfert de chaleur pour modéliser le comportement de fûts d'enrobés à l'échelle 1, d'autre part.

<sup>3</sup> Rapport d'évaluation n°6 de la CNE2- Novembre 2012. «(...) la Commission exige de recevoir pour décembre 2014 une démonstration en vraie grandeur avec une analyse de sûreté du comportement en stockage du colis primaire et de son conteneur, dans les conditions les plus pénalisantes (incendie). L'analyse de sûreté doit être faite conjointement par le CEA et l'Andra (...). »

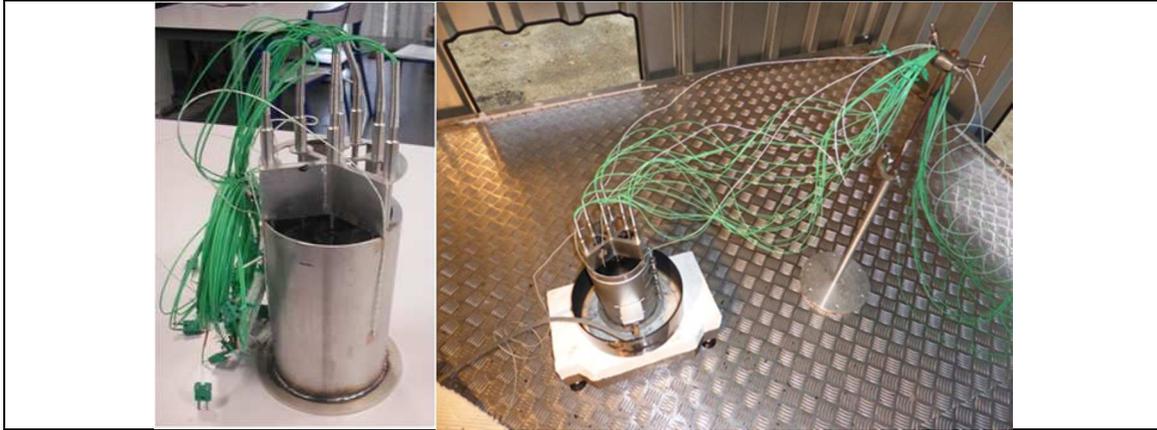


Figure 17 : Montage expérimental de mesure des températures pour étude du comportement thermique d'enrobés à l'échelle de 2kg par chauffe externe graduelle (gauche). Chambre expérimentale du dispositif (droite).

3. Environ cent vingt essais de mesure par microcalorimétrie des propriétés thermiques intrinsèques ont été réalisés à l'échelle du gramme, sur des enrobés de compositions sélectionnées pour être statistiquement représentatifs de la production industrielle. La sélection des échantillons à mesurer a été réalisée par la méthodologie des plans d'expériences. Cette dernière permet d'établir des modèles mathématiques prédictifs, par interpolation, des valeurs de chaque propriété thermique d'intérêt pour tous les domaines industriels. Les propriétés thermiques d'intérêt sont la température de déclenchement des réactions exothermiques et l'énergie dégagée par les réactions avec la puissance instantanée et l'énergie totale délivrées.

### 6.2.2 Résultats acquis

Les résultats scientifiques acquis, fondés sur les expériences et les calculs aux conditions aux limites physiques et chimiques parfaitement définies, sont les suivants :

1. A l'échelle 1 réelle, le colis de stockage en béton soumis à un feu de plus de 1000°C pendant 2 heures assure une protection thermique extrêmement efficace des 4 fûts d'enrobés bitumineux face à l'onde de chaleur qui s'y propage depuis l'extérieur. La température de ces derniers n'atteint pas plus de 120°C, très ponctuellement en certains points des faces externes de leur enveloppe métallique. Dans la masse, la température reste toujours inférieure à 80°C. Aucun endommagement des enrobés n'a lieu, ni auto-échauffement ni auto-inflammation ; les fûts d'enrobés restent intègres physiquement. De plus, le conteneur de stockage béton reste confinant et manutentionnable post-incendie. Des études ont été également conduites avec un conteneur de stockage à l'épaisseur renforcée de béton (20 cm) conduisant à réduire encore plus la température ponctuelle à l'intérieur du conteneur, à une valeur n'excédant alors pas 70°C.
2. Les essais de chauffe jusqu'à 300°C à l'échelle de 2kg d'enrobés montrent que la température atteinte à cœur peut atteindre 250°C. Pour autant, aucune composition d'enrobé bitume ne s'est auto-échauffée ni auto-enflammée dans ces conditions. Cette réponse confirme les données historiques des dossiers de sûreté des exploitants nucléaires, qui considèrent une température d'auto-inflammation supérieure à 300°C. Le caractère isolant de l'enrobé

explique les forts gradients de température interne. La faible diffusivité thermique de l'enrobé induit la très faible vitesse de propagation du front de chaleur vers l'intérieur. Typiquement, une sollicitation brutale externe à 100°C durant 80 minutes conduit à l'atteinte d'une température à cœur de seulement 50°C pour un cylindre de 55 mm de rayon. Les processus physiques de transfert de chaleur sont identifiés : ils sont uniquement par conduction de l'ambiante jusqu'à 110°C. Ce mode de transfert thermique reste prépondérant tant que la viscosité n'a pas chuté fortement pour des températures supérieures à 140°C et qu'un gradient de température vertical s'opposant à la gravité n'a pas été créé.

Les conditions d'occurrence d'un auto-échauffement dépendent conjointement du profil interne de température, de l'énergie et de la puissance instantanée délivrées par les réactions exothermiques. Ces processus physiques ont été mis en équations mathématiques à des fins de modélisation. La confrontation du modèle de comportement thermique de l'enrobé avec les résultats des essais à l'échelle 1 valide la phénoménologie des processus physico-chimiques identifiés. A un instant donné, il est démontré que seule une faible partie du volume de l'enrobé atteint des conditions de température susceptible de déclencher une réaction exothermique.

- a. l'hypothèse d'une libération instantanée de la totalité de l'énergie liée à des réactions exothermiques du volume d'un fût doit être exclue. De plus, la restitution d'énergie s'étale dans le temps sur plusieurs heures après le dépassement de la température.
  - b. les conditions d'entreposage, conduisant à une température interne initiale basse des enrobés, empêchent le déclenchement des réactions chimiques exothermiques à cœur susceptibles de conduire à un auto-échauffement et un emballement thermique de l'ensemble d'un fût en l'absence d'une sollicitation thermique extérieur de plusieurs heures.
3. La méthodologie des plans d'expériences, intégrant les mesures de microcalorimétrie, a permis de définir la température d'amorçage de réactions exothermiques potentielles, l'énergie dégagée et la puissance délivrée, pour chaque domaine industriel de composition. Les faits sont les suivants :
- a. de l'ambiante jusqu'à 150°C, les énergies et les puissances thermiques mesurées sont non significatives (dans l'incertitude expérimentale) pour tous les domaines de composition. Les modélisations thermiques d'échauffement montrent de plus que l'atteinte d'une température de 150°C à cœur d'un colis nécessiterait des durées de sollicitation thermique externe au colis très longues et supérieures à 24 heures et une température maintenue en parois externes supérieure à 150°C. Cela implique qu'une température extérieure inférieure à 150°C n'est pas suffisante pour démarrer des réactions exothermiques au sein de l'enrobé, même pour une exposition de durée infinie ;
  - b. dans la gamme de températures 150°C-200°C, aucune composition chimique de l'ensemble des 5 domaines d'enrobés industriels ne conduit à une puissance supérieure à 4,5 mW/g. Les puissances thermiques mises en jeu sont très faibles. Or une puissance inférieure à 5 mW/g permet de garantir l'absence d'un auto-échauffement de l'enrobé sur tout le domaine industriel produit.

La maîtrise de la réactivité des fûts de déchets bitumés de Marcoule a fait l'objet d'une étude complémentaire [12] dont les principaux résultats sont :

- Un colis de boues bitumées est soumis à un processus d'auto-irradiation au cours du temps. La matrice bitume subit alors une transformation physique par augmentation de sa viscosité. Cette évolution de viscosité, quantifiée par des lois de viscosité dépendant de la dose intégrée, est faible et opposée à l'évolution liée à la température. Elle se révèle sans impact sur les propriétés thermiques intrinsèques des colis.
- En situation de sollicitation thermique extérieure aux colis de boues bitumées (étude de scénarii accidentels d'incendie en entreposage et en stockage géologique), un amorçage de réactions exothermiques internes au colis entre certains sels de co-précipitation des radionucléides, nécessite à minima le dépassement d'une température seuil. Cette condition est nécessaire mais pas suffisante. Si localement la température d'amorçage d'une réaction exothermique est atteinte, une production d'énergie intervient et conduit à une hausse supplémentaire de la température interne de l'enrobé. Si cette hausse est suffisante pour compenser les pertes et les transferts de chaleur vers les parties plus froides, un auto-échauffement peut éventuellement se produire. Les conditions d'un auto-échauffement dépendent essentiellement du profil interne de température, de l'énergie et de la puissance instantanée délivrées par les réactions exothermiques.
- Une démonstration de sûreté vis-à-vis du risque de sollicitation thermique externe au colis a été construite, pour des configurations de température et de durée très contraignantes, afin de dégager des marges sur les principaux paramètres. Ainsi, même une augmentation par un facteur 4 de l'énergie totale dissipée, ou de la puissance thermique instantanée, ne conduirait pas à un auto-échauffement pour une sollicitation thermique externe maintenue à 180°C sur l'ensemble du volume d'un colis d'enrobé, pendant 24h.

La maîtrise de l'hétérogénéité des enrobés a aussi fait l'objet d'une étude [15] qui a montré que :

- Un dépôt en fond (concentration x 2) est acceptable
- Une concentration x1.5 et une durée de sollicitation de 24h à 180°C aussi

Une étude de sûreté complémentaire a été menée sur la maîtrise des risques incendie des colis de boues bitumées en condition de stockage [11]. L'étude conclut à l'existence de marges de sûreté très importantes.

- En effet, l'énergie délivrée par des réactions exothermiques éventuelles (ou suite à un autre apport d'énergie ou à la prise en compte de conditions aux limites extrêmes) n'est pas suffisante pour élever jusqu'à 180°C la température d'un enrobé entreposé à une température ambiante de l'ordre de 30°C.
- Le caractère robuste et enveloppe d'un code de calcul intégré de radiolyse et de gonflement de fûts, suite à la présence de bulles d'hydrogène a été testé, puis validé. Il permet de quantifier de manière majorante les taux de gonflement (70% au maximum) et les débits d'hydrogène maximaux (<10 L/an/fût primaire) conséquence de la radiolyse de la matrice bitumeuse. Ainsi, le colis de stockage béton de référence actuel pour un stockage à Cigéo, contenant 4 fûts primaires d'enrobés de boues bitumées, conserve sa capacité de résistance mécanique, son intégrité physique et donc sa capacité de confinement. Une marge de sûreté significative additionnelle existe. Les calculs ont été poussés jusqu'à prendre en compte un taux de gonflement de 100%, sans que la résistance mécanique du colis de stockage béton ne soit mise en défaut.

### 6.2.3 Conclusions en termes d'analyse de sûreté incendie des colis d'enrobés de boues bitumées

Les résultats scientifiques précédents fondent les conclusions de sûreté suivantes [12] :

- La puissance dégagée par les réactions exothermiques des enrobés industriels, dans la gamme de températures 50°-200°C, est faible et systématiquement inférieure à 5 mW/g.
- Une puissance inférieure ou égale à 5mW/g garantit l'absence d'auto-échauffement de l'enrobé sur la plage de température de l'ambiante jusqu'à 200°C.
- Le maintien à 180°C d'enrobés, pendant une durée d'une journée, n'est pas capable de conduire à un auto-échauffement.
- Sur la base de la configuration des colis de stockage béton, les essais d'incendie à l'échelle réelle montrent que la sollicitation thermique sur l'enrobé de boues bitumées est limitée à 120°C, de façon ponctuelle en certains points. Cette température est bien en deçà de la température maximale de 300°C de sollicitation atteinte lors des essais de comportement à moyenne échelle, qui n'a pas démontré de processus d'auto-inflammation. Ainsi, il existe une marge de sûreté très conséquente d'au-moins 100°C.

### 6.2.4 Prise en compte des effets de l'irradiation interne sur le comportement en situation d'incendie d'un enrobé de boues bitumées

Le CEA a mené une étude [13] des effets de l'irradiation interne sur le comportement en situation d'incendie d'un enrobé de boues bitumées.

Pendant les dizaines d'années d'entreposage dans les casemates puis l'installation EIP de Marcoule, les enrobés contenus dans les fûts sont soumis à un rayonnement permanent qui peut être évalué. La dose reçue peut être reproduite sur un temps plus court par irradiation externe sur des échantillons afin d'une part, de mesurer l'augmentation de la viscosité de l'enrobé liée à la dose intégrée et d'autre part, observer la formation de bulles d'hydrogène produites par radiolyse à l'intérieur de l'enrobé.

La rétention des bulles d'hydrogène formées dépend de l'équilibre entre le taux de production de gaz et la vitesse d'échappement des bulles. Cet équilibre se caractérise par un gonflement de l'enrobé correspondant à l'hydrogène gazeux piégé sous forme de bulles. La production de gaz est liée à l'importance de l'irradiation interne. La vitesse d'échappement dépend de la diffusion de l'hydrogène dans l'enrobé et de la vitesse de migration des bulles. En connaissant ces éléments, la rétention interne d'hydrogène peut être évaluée.

La présence de bulles, et donc d'un milieu diphasique modifie les échanges thermiques internes par conduction. Cette influence disparaît si toutes les bulles contenues s'échappent du volume. Ceci se produit en environ 1 heure dans le cas d'un enrobé STEL chauffé à une température de 110°C. Cette température est nettement inférieure aux températures reliées aux réactions chimiques et inférieure aux températures de référence pour les changements de caractéristiques physiques de l'enrobé. Il y a donc découplage entre l'échappement des bulles initialement présentes et les phénomènes de réactions exothermiques lors d'une sollicitation d'un fût d'enrobé de boues bitumées actives par un incendie externe. Les transferts de masse dans l'enrobé interviennent également quand la majorité des bulles initialement présentes se sont échappées.

### 6.3 Conclusion sur la disponibilité à l'horizon 2045-2050 d'un modèle de colis de transport de type B adapté aux colis bitume de Marcoule

D'après l'analyse du CEA, la disponibilité en temps et en heure d'un emballage de type B permettant de réaliser les transports vers Cigéo à l'horizon 2045-2050 sera atteignable industriellement.

En outre le CEA se garde la possibilité de mutualiser l'utilisation, la fabrication ou la conception de certains emballages avec Orano et EDF ou de choisir ou concevoir ses propres emballages. Le choix définitif des emballages de référence sera fonction de la stratégie d'aménagement des installations expéditrices et des infrastructures de transport, dont découlent les capacités des emballages et aussi l'optimum des coûts d'ensemble de la filière.

L'éventuelle mutualisation sera étudiée en tenant compte du petit flux additionnel que constituerait le transport des colis non IP2 depuis Marcoule : En particulier, la limitation de masse de l'emballage, pour un flux réduit, pourrait amener à privilégier le développement d'un emballage de plus petite capacité.

Le CEA a par exemple réalisé en mars 2017, le retour d'un fût d'enrobés bitumineux (FEB échelle 1 actif) de Marcoule qui avait été transporté à Cadarache (INB Chicade) il y a une quinzaine d'années. Ce transport a été effectué avec un caisson IP2 contenant un emballage RD16, car le RD16 n'était plus agréé comme château de transport voie publique.

Enfin, le CEA rappelle également que la présente note a été rédigée, conformément à l'article 47 de l'arrêté [1] pour juin 2018 alors que l'instruction IRSN des dossiers CEA sur les colis de boues bitumées est toujours en cours. Aussi, dans l'attente des avis de la CSLUD, du GPD, puis de l'ASND et de l'ASN qui en résulteront, les éléments présentés ne sauraient donc être considérés comme définitifs, de ce point de vue.

## 7 Recherche de l'optimum global dans la gestion des différentes filières

La disponibilité d'un modèle de colis de transport de type B, le moment venu, à l'horizon 2050 ou au-delà pour gérer les quelques derniers transports de FEB vers Cigéo ne présente aucune difficulté perceptible actuellement.

Ces quelques transports viendraient vraisemblablement après et en complément des autres nombreux transports en IP2 déjà effectués vers les centres de l'Andra, le CSA puis le FAVL puis à Cigéo dans le module de déchargement horizontal pour optimiser dans sa globalité la gestion des déchets du CEA.

Dans tous les cas, le CEA, compte tenu de ses missions, se doit de garantir pour les autorités :

- a. la qualité scientifique de la démonstration dans les différentes instructions contribuant aux prises de décision (reprise des déchets et mode d'entreposage, éventuel traitement des déchets, conditionnement en colis, transport des colis, mode de stockage des colis) ;
- b. la préservation de l'argent public, qui implique des solutions proportionnées aux enjeux. Aussi, si la conception existante des colis, de leurs transports et des stockages CSA, FAVL et CIGEO s'avère suffisante pour maîtriser l'ensemble des risques, la mise

en œuvre de ces solutions de gestion devrait être décidée. Cette préservation des moyens mobilisables milite pour des prises de décisions opérationnelles, car les repousser amènerait à poursuivre de multiples voies en parallèle ce qui est aussi source de dépenses.

Enfin, les flux des transports vers l'ensemble des stockages devront aussi faire l'objet d'une optimisation globale. Ainsi, si le ferroutage peut ne pas s'avérer pertinent pour le flux des transports vers l'un des centres de stockage de l'Andra, comme noté dans le rapport remis fin 2017 pour l'analyse de la logistique des colis FMA à destination du CSA, au titre de l'article 34 de l'arrêté PNGMDR [1], la massification des flux peut permettre d'accroître l'attractivité de ce mode de transport. Pour Décembre 2018, l'analyse de l'intérêt du ferroutage pour les flux TFA vers le CIREs, au titre de l'article 32 du même arrêté, pourra permettre de mesurer l'intérêt d'une première mutualisation entre CSA et CIREs. Le site FAVL identifié par l'Andra, sur la commune de Juzanvigny, permettrait à terme une mutualisation supplémentaire par exemple par l'utilisation du terminal ferroviaire de Brienne, initialement conçu pour la seule desserte du CSA.

## 8 Conclusions

En résumé, pour le CEA une grande majorité des colis de transport seront des colis IP2 et transportables suivant des pratiques déjà couramment mises en œuvre actuellement et disposant d'un retour d'expérience industrielle avéré. Cette conclusion repose évidemment sur l'hypothèse d'une stabilité des exigences définies dans la réglementation transport actuelle.

Cette conclusion repose sur l'hypothèse pénalisante de transports réalisés en 2035 pour l'ensemble des fûts d'enrobés bitumineux, or le programme de reprise des fûts des casemates de Marcoule, considère de manière volontariste une reprise des derniers fûts à l'horizon 2048. Ce programme, tel que présenté dans la stratégie et priorisation des opérations de démantèlement et de reprise des colis de déchets de décembre 2016 aux autorités de sûreté, ASND et ASN, a fait l'objet d'une instruction par l'IRSN, puis d'une CSLUD et d'un Groupe Permanent Déchets en juin 2018 aboutissant à confirmer l'ordre des priorités de sûreté des opérations à venir. De plus, une fois les stockages Andra disponibles, les limitations des capacités de désentreposage depuis les installations de type EIP contraindront les flux annuels de transports. Il faut ainsi noter que 62 000 fûts donneraient lieu à 15 500 colis de 4 fûts qui nécessiteront de maintenir un flux de transport de plus de 775 colis par an pendant 20 ans, entre Marcoule et les stockages de l'Andra.

Aussi, considérant que les transports des colis constitués s'étaleront plus vraisemblablement sur deux décennies à l'horizon 2040 – 2060, le respect des débits de dose résultant essentiellement du Césium dans le spectre de tels colis, permettra de dé-catégoriser la plupart des colis actuellement catégorisés en type B non fissile.

Ainsi, en conclusion, le CEA dispose de l'ensemble des éléments en 2018 permettant d'anticiper les actions nécessaires pour préparer les transports au-delà de 2035 de colis de boues bitumées vers les stockages de l'Andra.

Les opérations de reprise des fûts d'enrobés bitume, programmées jusqu'en 2048, permettront soit de transférer les colis dans les entreposages EIP (Entreposage Intermédiaire Polyvalent de Marcoule) soit de les expédier directement vers les stockages de l'Andra.

## 9 Références

- [1] 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
- [2] Note Andra « Planning objectif ». Les conditions de réversibilité ont été définies par la loi adoptée le 11 juillet 2016 par l'assemblée nationale.
- [3] Note Andra DG/17-0163 du 22 septembre 2017 « Gestion des déchets radioactifs de faible activité massique à vie longue - Date prévisionnelle de mise en service d'un nouveau centre de stockage dans l'Aube » en réponse à l'article 37 de [1] qui précisait que «Pour le 31 mars 2017, l'ANDRA propose une date de mise en service objective et prudente d'une installation de stockage à faible profondeur de déchets de faible activité vie longue».
- [4] Note Andra DG/17-0128 du 21 juin 2017 « Proposition de types et de quantités de déchets à inclure dans l'inventaire de réserve de Cigéo en application de l'article 56 de l'arrêté du 23 février 2017 »
- [5] Note Andra DISEF/DIR/18-0060 - Avril 2018 - «Enjeux de sûreté après fermeture autour d'un concept de stockage à faible profondeur pour la gestion de déchets de type FAVL»
- [6] Programme Industriel de Gestion des Déchets (PIGD) version E Novembre 2016. Document quadripartite Andra-Areva-CEA-EDF.
- [7] Rapport Areva-CEA-EDF du 30 juin 2015 « Transport des colis de déchets HA-MAVL pour l'expédition vers le centre de stockage géologique » en réponse à l'article n°17 du décret n°2013-1304 du 27 décembre 2013 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. PNGMDR Période 2013-2015.
- [8] Rapport Andra FRP A DPG 15 0010 de Juillet 2015 « PNGMDR 2013-2015 – Projet de stockage de déchets radioactifs de faible activité massique à vie longue (FA-VL) Rapport d'étape 2015 ».
- [9] Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2017 (dit ADR)
- [10] Rapport Andra SUR NT AMES 07-0057 « Etude des caractéristiques physiques, radiologiques et chimiques des bitumes de Marcoule les moins actifs » 11/2007
- [11] Rapport PNGMDR Note technique CEA DEN/DDCC DO 4 du 29 juin 2017 « Comportement physico-chimique et thermique des colis de boues bitumées pendant les phases d'entreposage, puis de stockage réversible et au-delà (PNGMDR 2016-2018 art 46-1) »
- [12] Note technique CEA DEN/DANS/SP2S/NT/17-085-B du 19 décembre 2017 « Evaluation de la réactivité des fûts d'enrobés de boues bitumées de la STEL de Marcoule sous sollicitation thermique extérieure ».
- [13] Note technique CEA DEN/DANS/SP2S/NT/16-040 Indice A, du 2 décembre 2016 « Prise en compte des effets de l'irradiation interne sur le comportement en situation d'incendie d'un enrobé de boues bitumées »
- [14] Note technique CEA DEN/DADN/DO 260 du 15 décembre 2014 « Domaine de composition des enrobés bitumineux produits par la STEL de Marcoule ».
- [15] Note technique CEA DANS/SP2S/NT/18-135/A du 23/05/2018 « Étude d'une répartition non homogène des sels dans un enrobé de boues bitumées en cas de sollicitation thermique externe ».