



**PLAN NATIONAL DE GESTION  
DES MATIERES ET DECHETS RADIOACTIFS  
2016-2018**

**ARTICLE 48-2**

***EVALUATION COMPAREE DES DIFFERENTS  
MODES DE GESTION ENVISAGES POUR LES  
DECHETS BITUMES***

*Janvier 2020*

## SOMMAIRE

I.	OBJET .....	3
II.	CONTEXTE DE LA DEMANDE.....	3
III.	METHODOLOGIE.....	5
III.1.	Périmètre de l'évaluation.....	5
III.2.	Démarche d'étude du traitement .....	6
III.3.	Définition de scénarios intégrés.....	7
IV.	SCENARIOS DE TRAITEMENT DES ENROBES BITUMES .....	9
IV.1.	Filière 1 : incinération-vitrification.....	9
IV.1.1.	Principe.....	9
IV.1.2.	Principaux résultats des études de pré-faisabilité .....	10
IV.1.3.	Incertitudes et besoins de R&D.....	11
IV.2.	Filière 2 : combustion classique et cimentation ou vitrification .....	12
IV.2.1.	Principe.....	12
IV.2.2.	Principaux résultats des études de pré-faisabilité .....	13
IV.2.3.	Incertitudes et besoins de R&D.....	14
IV.3.	Filière 3 : vaporeformage .....	15
IV.3.1.	Principe.....	15
IV.3.2.	Principaux résultats des études de pré-faisabilité .....	16
IV.3.3.	Incertitudes et besoins de R&D.....	16
IV.4.	Colis issus du traitement et options de stockage.....	17
IV.5.	Intégration globale .....	19
IV.5.1.	Les scénarios de gestion pour un traitement de l'ensemble des fûts de déchets bitumés	19
IV.5.2.	Impact d'un traitement partiel .....	22
V.	SCENARIOS DE STOCKAGE EN L'ETAT DES COLIS DE DECHETS BITUMES.....	23
V.1.	Stockage des déchets bitumés MA-VL en l'état dans Cigéo .....	23
V.2.	Stockage des déchets bitumés FA-VL.....	25
V.3.	Intégration globale .....	25
VI.	ELEMENTS D'ANALYSE DES SCENARIOS .....	27
VI.1.	Maturité technique .....	27
VI.2.	Sûreté et impact environnemental .....	27
VI.3.	Coût .....	29
VII.	CONCLUSION .....	31
VIII.	REFERENCES .....	34

## I. OBJET

L'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, demande par l'article 48.2 : « Pour le 31/12/2019, CEA, Areva, EDF et Andra remettent un rapport d'évaluation technique, économique et de sûreté comparant les différents modes de traitement et de conditionnement envisagés pour les déchets bitumés (stockage géologique et solutions alternatives). Cette étude intègre toutes les étapes de la gestion du déchet ainsi que l'impact des différents choix sur la conception et le dimensionnement de CIGEO : transport, sûreté en entreposage et en phase exploitation, impacts environnementaux, impacts radiologiques à long terme. »

Le présent document présente les premiers éléments de comparaison des différents modes de gestion envisagés pour les fûts de déchets bitumés compte tenu de l'état d'avancement des études pour chacune des étapes de gestion.

## II. CONTEXTE DE LA DEMANDE

Les déchets bitumés se composent de boues issues du traitement par co-précipitation des effluents radioactifs de Marcoule et de La Hague, et qui, après essorage et séchage, ont été enrobées dans du bitume. Cette matrice a été choisie pour ses propriétés de confinement sur le long terme.

La France a produit au total, depuis les années 1960, environ 75 000 fûts de déchets bitumés, pour la plupart en fûts de 220 litres. 62 000 fûts se trouvent sur le site de Marcoule, 13 000 sur celui de La Hague. Les deux exploitants Orano et CEA continuent à en produire – le CEA quelques dizaines par an, Orano une centaine environ.

La totalité des fûts de déchets bitumés de La Hague, et environ la moitié des fûts de déchets bitumés de Marcoule, sont considérés comme relevant de la catégorie MA-VL (moyenne activité à vie longue), et par conséquent identifiés dans l'inventaire de référence du projet de stockage en formation géologique profonde, Cigéo. L'autre moitié des fûts de déchets bitumés de Marcoule est considérée comme relevant de la catégorie FA-VL et par conséquent prévue dans l'inventaire d'un stockage dédié à cette catégorie de déchets, en cours de définition. Conformément à l'article 40 de l'arrêté du 23 février 2017 établissant les prescriptions du PNGMDR, ces déchets bitumés FA-VL sont aussi pris en compte dans l'inventaire de réserve de Cigéo, à titre conservatoire, compte tenu des incertitudes portant sur la mise en place d'une installation de stockage capable de prendre en charge tout ou partie des déchets aujourd'hui affectés au stockage FA-VL.

Les fûts de déchets bitumés MA-VL sont l'objet depuis de nombreuses années de questions relatives à leur tenue en stockage face à un incendie. A la suite de l'instruction du dossier d'options de sûreté (DOS) de Cigéo, l'ASN dans son avis rendu mi-janvier 2018 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, considère qu'il y a des incertitudes concernant les comportements physico-chimique et thermique de ces colis en stockage, en particulier en situations incidentelle ou accidentelle conduisant à une élévation de température, et demande l'étude de deux voies de gestion :

- le développement d'un procédé de traitement assurant la neutralisation de la réactivité chimique des colis de déchets bitumés en préalable à leur stockage ;
- le stockage en l'état des colis avec des évolutions substantielles des options de conception de l'installation de stockage, pour exclure le risque d'emballement de réactions exothermiques en cas d'incendie ou d'élévation de température.

Dans cet avis, l'ASN considère la première voie comme préférentielle et précise que la deuxième voie ne pourrait être retenue que pour des colis de déchets bitumés suffisamment caractérisés pour permettre une modélisation de leur comportement en stockage.

Pour rappel, le traitement par un procédé de combustion-vitrification a fait l'objet d'une première étude technico-économique prospective dans le cadre du PNGMDR 2013-2015 [3]. Cette étude portait sur un procédé de type SHIVA (Système Hybride d'Incinération Avancé) et avait identifié un certain nombre de verrous de procédé et technologiques, et mis en évidence un surcoût notable par rapport au stockage des colis de déchets bitumés en l'état.

En réponse à la demande PNGMDR article 48.1, le CEA en lien avec EDF, Orano et l'Andra, a remis fin juin 2018 un rapport [4] présentant l'avancement des travaux relatifs aux modes de traitement des déchets bitumés. Ce rapport, construit à l'issue de groupes de travail sur la R&D et l'industrialisation des procédés envisageables, a retenu trois filières de traitement<sup>1</sup> sur lesquelles il apparaissait opportun de poursuivre la réflexion :

- Filière 1 : incinération-vitrification,
- Filière 2 : combustion suivie d'un conditionnement par cimentation ou vitrification,
- Filière 3 : vaporeformage suivi d'un conditionnement par cimentation.

Dans les trois cas, le traitement requiert une alimentation des déchets bitumés sous forme divisée ; le rapport a préconisé un pré-traitement à froid (découpe ou cryobroyage).

La pertinence technico-économique de ces trois filières restait à évaluer.

Concernant la possibilité d'un stockage en l'état, en parallèle des études d'avant-projet détaillé et de préparation du dossier de Demande d'Autorisation de Création (DAC) de Cigéo, l'Andra a réalisé des études de scénarios techniques possibles en vue de renforcer la maîtrise des risques associés à la réactivité des colis de déchets bitumés en conditions de stockage et de répondre aux demandes exprimées par l'ASN. En réponse à l'article 46 second alinéa de l'arrêté du 23 février 2017, pris en application du décret no 2017-231 du 23 février 2017 établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets, l'Andra a présenté l'état d'avancement de ces études dans [7].

Le 13 juin 2018, le Ministre de la Transition écologique et solidaire et le président de l'ASN, faisant suite à une proposition de la Commission Nationale d'Evaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2), ont mandaté Christophe Fournier pour mener une revue scientifique internationale, avec comme objectifs d'évaluer :

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

Ce groupe de revue a rendu son rapport fin juin 2019 [2].

---

<sup>1</sup> Cette numérotation des filières ne suit pas celle des options évaluées dans [4], elle est propre au présent rapport.

### III. METHODOLOGIE

#### III.1. Périmètre de l'évaluation

L'inventaire de fûts de déchets bitumés à terminaison (produits et restant à produire) comporte [5] :

- 13 440 fûts de 220 L à La Hague,
- 61 732 fûts de 220L à Marcoule, dont le reconditionnement en sur-fûts de 380L est en cours,

soit, au total 75 172 fûts, arrondi dans la suite du rapport à 75 000.

Concernant les modalités d'entreposage de ces fûts, il est à noter que le site de Marcoule s'est engagé auprès de l'Autorité de sûreté nucléaire de défense (ASND), à désentreposer l'ensemble des fûts de déchets bitumés en casemates pour les reconditionner en sur-fûts et les entreposer en alvéoles d'entreposage de l'installation 3 support de Marcoule. Deux alvéoles (1&2), de capacité totale 11 500 fûts, sont déjà construits. Deux autres (3&4) sont en cours de construction et accueilleront 13 200 fûts. La construction des autres alvéoles restant nécessaires pour accueillir la totalité des fûts, est prévue d'ici 2040.

A La Hague, les halls d'entreposage, situés dans STE3, ont une capacité suffisante pour accueillir la totalité des fûts produits ou restant à produire.

L'ensemble des fûts de déchets bitumés de La Hague est identifié comme relevant de la catégorie MA-VL. Ceux de Marcoule sont à date déclarés à l'Inventaire National selon une répartition équilibrée entre les catégories MA-VL et FA-VL (respectivement 28 831 et 32 901, arrondis respectivement à 29 000 et 32 000 dans la suite du rapport).

Les hypothèses prises en compte dans la conception du stockage profond Cigéo sont cohérentes avec la répartition de l'Inventaire National 2018 : 42 271 fûts de déchets bitumés sont ainsi prévus à l'inventaire de référence de Cigéo, tandis que 32 901 fûts destinés à un stockage FA-VL sont retenus dans l'inventaire de réserve de Cigéo (arrondis respectivement à 42 000 et 33 000 dans la suite du rapport).

Cette répartition est basée sur les critères radiologiques du Centre de Stockage de l'Aube (CSA). Le CEA étudie une évolution potentielle de cette répartition, sur la base de l'amélioration des connaissances obtenue au fur et à mesure de la reprise des colis des casemates vers l'entreposage de l'installation 3 support de Marcoule, et en lien avec la date effective de prise en charge de ces colis en stockage. Cette approche qui, selon le CEA, pourrait conduire à accroître significativement la part de déchets bitumés de catégorie FA-VL, fera l'objet d'une instruction de l'Andra dans le cadre des études de scénarios relatives à la filière FA-VL.

Le présent rapport s'intéresse à la totalité de l'inventaire des fûts de déchets bitumés de Marcoule et La Hague. L'analyse comparée de scénarios et surtout la réalisation d'études de pré-faisabilité sur le procédé de traitement a nécessité de considérer des hypothèses quantitatives.

Concernant le traitement, il a été retenu pour les études, l'hypothèse de traitement de l'ensemble des 75 000 fûts de déchets bitumés. Ce choix reflète l'absence de discontinuité dans les propriétés radiologiques et les caractéristiques des deux catégories de déchets bitumés. Le traitement conduirait par ailleurs à un ensemble de colis dont la(les) catégorie(s) dépendra(ront) du procédé retenu (ce point sera précisé dans la suite du rapport). La sélection des procédés proposée dans le rapport de juin 2018 [4] a été réalisée sur cette base.

D'autres cas pourraient être envisagés :

- Traitement de l'inventaire MA-VL seul (42 000 fûts) : le volume à traiter reste très important, ce qui ne remet pas en cause le choix du type de procédé ;
- Traitement d'une fraction minoritaire de fûts, qui pourrait correspondre soit à une fraction des déchets bitumés MA-VL non acceptés en stockage dans Cigéo en l'état, soit à une fraction de déchets bitumés MA-VL réduite (en cas d'évolution de la répartition entre MA-VL et FA-VL). Dans ce cas, le choix du procédé de traitement pourrait être reconsidéré, afin d'être optimisé par rapport au nombre de fûts à traiter.

Concernant le stockage en l'état, il est considéré que l'ensemble des fûts de déchets bitumés MA-VL sont destinés à un stockage en l'état à Cigéo, et que les fûts FA-VL sont destinés à un futur stockage FA-VL. Au titre des incertitudes filières, ces derniers sont considérés dans l'inventaire de réserve de Cigéo et dans les études d'adaptabilité de Cigéo. Une évolution de la répartition entre MA-VL et FA-VL pourrait aussi influencer sur les résultats de la présente étude.

### III.2. Démarche d'étude du traitement

Pour évaluer la pertinence technico-économique des trois filières identifiées dans le rapport de juin 2018 [4], le CEA a piloté des études d'ingénierie de niveau pré-faisabilité.

La Figure 1 schématise les principales fonctions remplies par l'installation étudiées (le conditionnement du fût vide apparaît en pointillés car adapté uniquement aux procédés prévoyant une séparation fût/bitume).

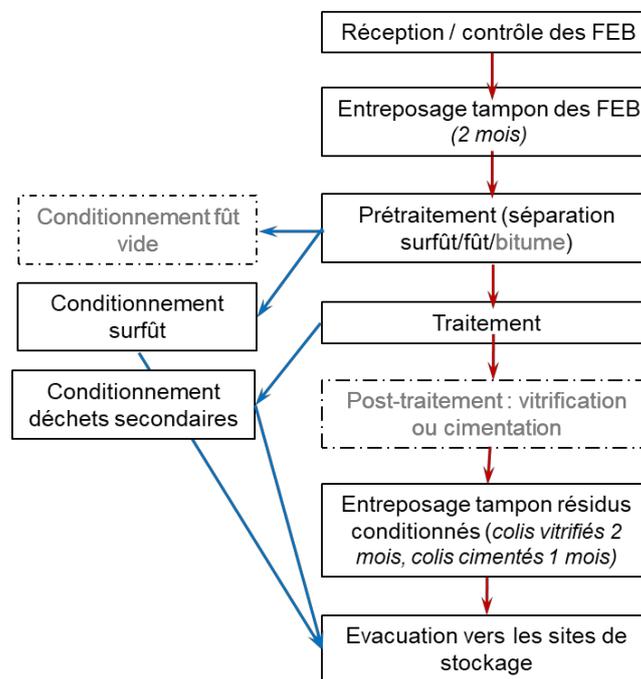


Figure 1 : principales fonctions remplies par l'installation de traitement

Pour réaliser ces études, un certain nombre d'hypothèses ont été posées. Ces hypothèses pourraient si besoin être requestionnées, elles représentent cependant des options réalistes. Ces hypothèses sont notamment les suivantes :

- Traitement de l'ensemble des 75 000 fûts de déchets bitumés,
- La durée d'exploitation de l'installation est prise égale à 20 ans avec une sensibilité à 30 ans de fonctionnement,
- L'installation reçoit les fûts de déchets bitumés après transport en emballage de type TN833.

En première approche, il est pris comme hypothèse que l'installation serait implantée sur l'un ou l'autre site actuel d'entreposage des fûts de déchets bitumés (Marcoule ou La Hague).

Selon la filière étudiée, le post-traitement peut consister, soit en une vitrification, soit en une cimentation des résidus produits.

Dans le cas de la cimentation, des taux d'incorporation de 10 et 15% massique ont été considérés. Ces valeurs correspondent à la limite physico-chimique d'incorporation de sels dans un ciment, en cohérence avec les études de R&D menées sur des constituants du même type. Le colis final est un fût de volume utile pris égal à 500 L.

Dans le cas de la vitrification, le taux d'incorporation du déchet se traduit par un facteur de concentration volumique (FCV) de 2 entre le bitume et le verre produit. Cette valeur est une moyenne issue d'essais de R&D, qui serait à conforter voire à optimiser par un programme de R&D ciblé. Le colis produit est :

- Soit un contenant de type CSD (Conteneur Standard de Déchets de la Hague), de volume industriel de 180L permettant ainsi de retenir une géométrie déjà considérée pour un stockage à Cigéo (déchets vitrifiés HA et MA-VL, déchets compactés MA-VL),
- Soit un colis de même hauteur mais de diamètre plus important, permettant d'optimiser le remplissage, donc les cadences de traitement, et potentiellement son stockage dans Cigéo (par exemple dans les espaces vides des alvéoles HA) (cf. détail au §IV.4). Ce colis, appelé CSD+, a un volume industriel de l'ordre de 370L.

L'installation réexpédie vers le centre de stockage « ad hoc » :

- Soit des colis de verre en emballage du type TN28 (28 CSD ou 16 CSD+ par emballage),
- Soit des colis cimentés 500 L mis par 4 en colis de type CBFK qui ne nécessitent pas d'emballage de transport spécifique.

En complément des études réalisées par les ingénieries, le CEA a mené une revue technique d'experts pour en analyser la robustesse, et identifier les incertitudes et les points durs de chacune. Le chapitre IV est consacré à la description des filières issue de ces travaux, en intégrant les enseignements de cette expertise.

### III.3. Définition de scénarios intégrés

L'objectif du rapport est d'évaluer les différentes voies de gestion des déchets bitumés en tenant compte de l'ensemble des étapes, de leur entreposage sur site de production jusqu'à leur stockage définitif, en l'état ou traités ([Figure 2](#)). Dans le cas du stockage en l'état, les colis sont destinés à Cigéo (inventaire de référence MA-VL) et au site FA-VL en projet, avec en repli un stockage de l'ensemble (inventaire de référence et inventaire de réserve) à Cigéo dans le cadre des études d'adaptabilité. Dans le cas du traitement, le mode de stockage sera fonction de la filière de traitement et du(des) conditionnement(s) retenu(s).

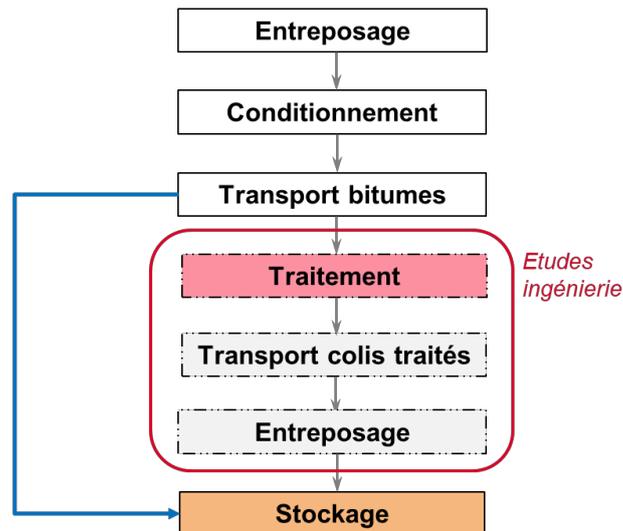


Figure 2 : découpage fonctionnel de la gestion des fûts de bitumes

Cette démarche globale s'est appuyée sur :

- les études pilotées par le CEA pour le traitement ;
- les études de l'Andra en cours sur le stockage des déchets bitumés en l'état dans Cigéo [7] ;
- pour les colis issus du traitement, des évaluations préliminaires menées par l'Andra pour un stockage dans Cigéo, et les conditions d'acceptation dans les stockages existants ;
- les études de concept menées par l'Andra sur le stockage FA-VL [8][9] ;
- la prise en compte des contraintes d'entreposage sur les sites de Marcoule et La Hague ;
- la prise en compte des spécificités de chaque type de colis pour le transport des fûts de déchets bitumés et des colis issus du traitement.

Les scénarios sont évalués selon trois grandes familles de critères :

- Maturité technique,
- Sécurité et impact environnemental,
- Coût.

## IV. SCENARIOS DE TRAITEMENT DES ENROBES BITUMES

### IV.1. Filière 1 : incinération-vitrification

#### IV.1.1. Principe

Les principales étapes du procédé sont représentées dans le diagramme fonctionnel de la Figure 3.

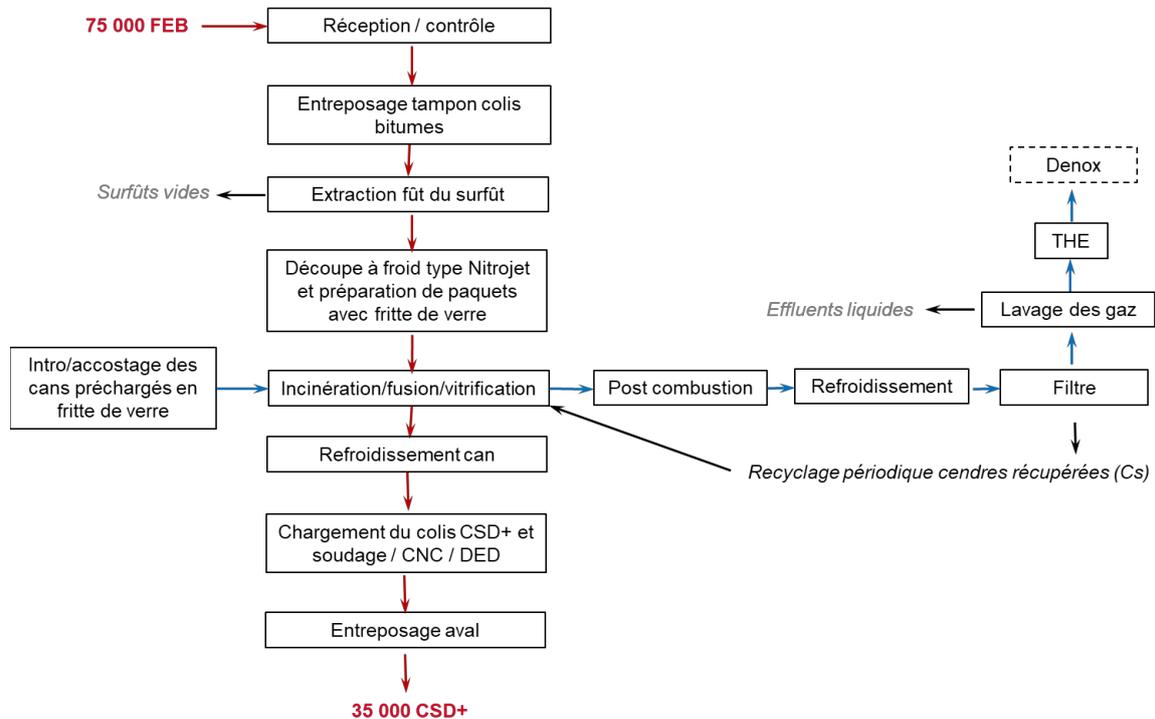


Figure 3 : diagramme fonctionnel du procédé filière 1

Deux options sont possibles pour assurer le prétraitement des fûts entiers de déchets bitumés afin d'alimenter le procédé sous forme divisée :

- découpe du fût entier en cubes par jet haute pression à l'azote liquide (type Nitrojet®),
- cryobroyage.

Dans le cadre des études réalisées, la première option a été considérée, ce procédé ayant été jugé plus favorable en termes de risques de dispersion et de maintenance.

L'incinération-vitrification est réalisée dans un équipement unique inspiré du procédé PIVIC développé pour les déchets métalliques et organiques contaminés par des émetteurs alpha [6]. Des adaptations de celui-ci ont été proposées pour tenir compte de la spécificité des bitumes (rapport métal/verre bien plus faible, forte proportion d'organiques) et optimiser les cadences.

Des paquets contenant des morceaux de fûts de déchets bitumés et fritte de verre sont constitués et alimentent la zone supérieure de l'équipement où la partie organique est incinérée à l'aide d'une torche à plasma. Un pot de fusion appelé « can », préchargé en fritte de verre, est positionné sous la chambre d'incinération dans la partie four de l'équipement, et reçoit le résidu. Le verre y est directement chauffé par induction haute fréquence (à la différence de PIVIC qui met en œuvre une induction moyenne fréquence assurant la fusion du métal). La décomposition des sulfates présents

dans l'enrobé bitumineux requiert une température supérieure à 1500°C. Le can est ensuite figé à poste puis refroidi à cœur après désaccostage, et déposé dans le conteneur final (1 seul can par conteneur). Le mode de chauffe requiert un can céramique (transparent au champ magnétique). Le produit est un vitrifiat avec des inclusions métalliques.

Le traitement des gaz comporte des étapes successives de post combustion, refroidissement par dilution à l'air, pré-filtre électrostatique (récupération des poussières riches en césium dans un cendrier pour réintroduction dans le procédé), filtre THE, colonne de lavage des gaz pour piéger les nitrates et sulfates, condenseur et dévésiculateur, Denox si besoin pour traiter l'azote de combustion.

#### *IV.1.2. Principaux résultats des études de pré-faisabilité*

Le volume utile du can est réduit par l'épaisseur de la céramique. Aussi, un conditionnement en CSD n'offre qu'un volume utile de 70L, pénalisant fortement la capacité de traitement de l'installation. En conséquence, ce type de procédé oriente vers un conditionnement plus capacitif de type CSD+ décrit au §III.2, de volume utile 185L. Le flux sortant correspond à environ 35 000 CSD+ (au lieu de 95 000 CSD). La hauteur de ce CSD+ est à voir comme un maximum, les conditions de procédé et les contraintes de transport pouvant orienter vers un colis plus court, au détriment de la capacité de l'installation.

L'exploitation est prévue en 5x8, 210 jours par an. Le procédé fonctionne en batch. Sur la base des données disponibles, les estimations de capacité conduisent à un fonctionnement sur une durée minimale de 30 ans avec 3 chaînes pour assurer le traitement de l'ensemble des fûts.

L'analyse préliminaire de sûreté indique que le risque principal concerne la criticité, du fait de la présence de plutonium (en quantité faible) dans certains fûts. Un mode de gestion par masse et géométrie est retenu pour les entreposages, et une gestion par la masse est retenue pour les unités du procédé. L'accumulation de plutonium en parois des équipements (notamment du four d'incinération) sera suivie par comptage périodique et des opérations de vacuité seront menées périodiquement. Pour assurer la maîtrise du risque de criticité, il est prévu d'introduire un outil de nettoyage des parois et un outil de contrôle de la vacuité dans les équipements. Le procédé de type « in can » conjugué à l'absence de réfractaire sont des éléments facilitant la démonstration de criticité.

Les autres risques identifiés sont principalement :

- la dissémination de matières radioactives au niveau des équipements procédé (broyage/découpe, procédé) : mise en place de systèmes de confinement ;
- l'explosion
  - o liée à la libération de l'hydrogène contenu dans le bitume lors du broyage : gestion par dilution instantanée dans la cellule,
  - o liée à une accumulation de gaz en situation accidentelle.

Le risque d'incendie lié à la présence de bitume est exclu (température inférieure à 50°C en amont du traitement thermique).

L'exploitation et la maintenance sont réalisées en téléopération : c'est une différence importante avec PIVIC qui est conçu pour fonctionner en boîte à gants du fait de l'absence de produits de fission.

Le procédé est, autant que possible, conçu pour être favorable à une maintenance à distance compte tenu du peu de pièces mécaniques en contact direct avec le déchet, de la compacité et de la modularité du réacteur. La taille et la masse limitées des composants permettent une maintenance avec des outils classiques (pas de moyens lourds). Cependant, la maintenance en téléopération reste une opération

délicate. Le remplacement d'une virole, ou d'éléments du four à induction, demeurera une opération lourde.

Le procédé génère des effluents liquides issus du traitement des gaz (de l'ordre de 2300 m<sup>3</sup> par an, à traiter sur une installation de traitement d'effluents), et des rejets gazeux constitués principalement du CO<sub>2</sub> issu de la décomposition du bitume (de l'ordre de 1700 tonnes par an). Le traitement des gaz sera conçu de sorte à rendre les activités et teneurs en NO<sub>x</sub> et SO<sub>x</sub> résiduelles, compatibles avec la réglementation.

Le procédé permet de traiter l'ensemble du fût, y compris son enveloppe métallique, minimisant ainsi les déchets secondaires (limités au surfût et aux déchets induits par le procédé).

#### *IV.1.3. Incertitudes et besoins de R&D*

Les principales incertitudes spécifiques à la filière 1 sont résumées ci-après :

- Cadence du procédé Nitrojet® : le procédé est à développer car actuellement limité par l'épaisseur de découpe. Il faudra l'adapter à la découpe de fûts entiers ; la taille des morceaux sera à définir en lien avec l'étape d'incinération, le risque principal porte sur la durée requise pour atteindre cette taille, plus que sur la faisabilité même.
- Cadence de l'incinération-vitrification : le diagramme des temps qui a servi de base aux études a été proposé à partir des connaissances acquises sur PIVIC mais nécessite consolidation par de la R&D.
- Adaptation du procédé PIVIC aux déchets bitumés : la faisabilité technique reste à démontrer. Un nouveau développement est notamment à prévoir sur le mode de chauffe, qui implique la mise en œuvre d'un creuset céramique.
- L'exploitation en cellule blindée, et non en boîte à gants, requiert une adaptation des principes de maintenance et par conséquent un développement spécifique des composants (par exemple, les torches et le creuset céramique).
- Un traitement des gaz spécifique est à développer, en tenant compte du bitume, produit particulier, et des volumes à traiter : très fortes quantités d'organiques avec une charge minérale importante qui se décompose en température, liquéfaction lors de la chauffe, génération de suies et produits volatils (gestion du césium).
- Les démonstrations de sûreté nécessiteront un suivi matière précis qu'il faudra mettre au point en tenant compte de la présence de produits de fission, qui rend délicate la mesure des émetteurs alphas.

Les besoins de R&D peuvent se décliner en 4 grandes thématiques :

1. Développement du procédé de découpe des fûts ;
2. Faisabilité et performance du procédé d'incinération/vitrification appliqué aux bitumes, développement et qualification ;
3. Faisabilité et performance du procédé de traitement des gaz ;
4. Définition et qualification du colis et de la matrice, en lien avec leur entreposage et leur stockage.

Le développement du procédé de découpe doit se faire en lien étroit avec celui de l'incinération, de sorte à définir la dimension optimale attendue pour les fragments de déchets bitumés.

Ce développement passera par la conception et la construction d'un prototype échelle 1 destiné à réaliser des essais sur des fûts « simulants » inactifs visant à définir les domaines de fonctionnement

(notamment températures), valider les choix technologiques, optimiser les cadences, mettre au point les principes de maîtrise de la dispersion et de maintenance.

Dans le cas du procédé PIVIC, la durée totale de développement du procédé est de l'ordre de 15 ans. En se basant sur le développement du procédé PIVIC, la même durée peut être considérée pour le développement et la qualification d'un procédé d'incinération-vitrification appliquée aux enrobés bitumés, en supposant qu'il n'y ait pas de points durs spécifiques à solutionner.

## IV.2. Filière 2 : combustion classique et cimentation ou vitrification

### IV.2.1. Principe

Les principales étapes du procédé sont représentées dans le diagramme fonctionnel de la Figure 4.

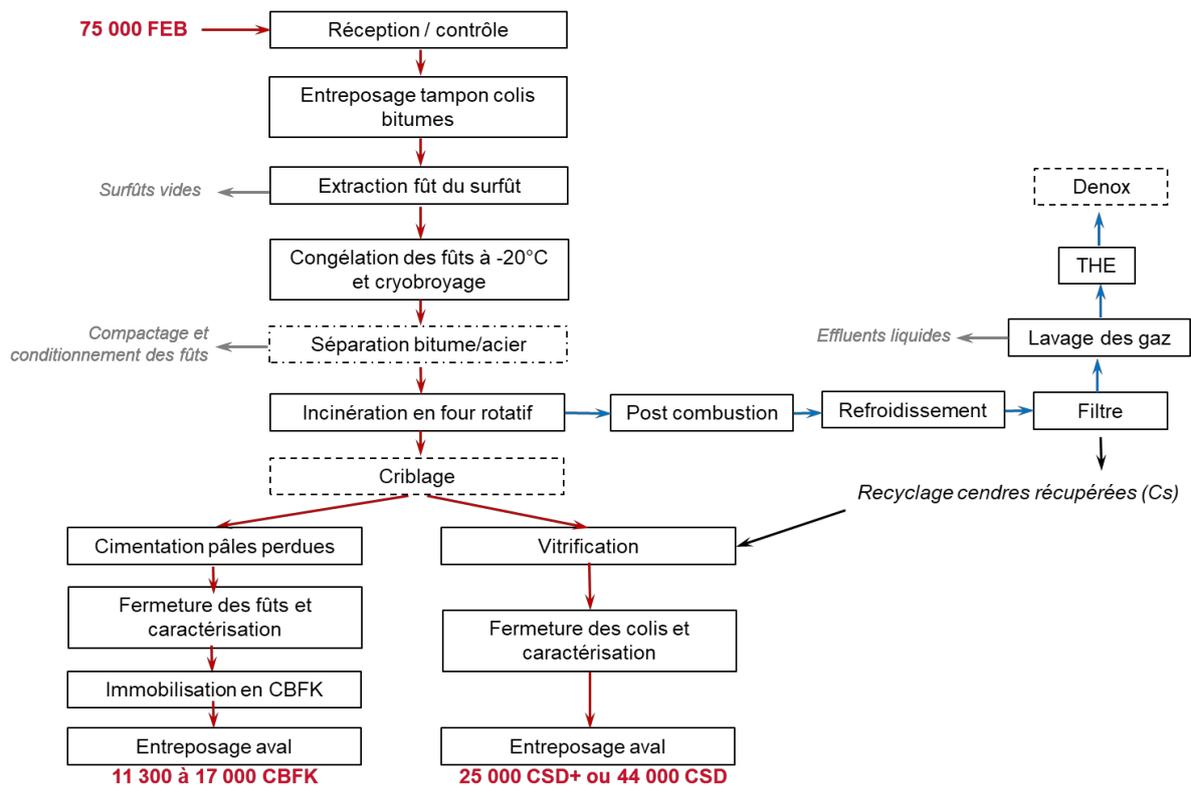


Figure 4 : Diagramme fonctionnel du procédé filière 2

Une séparation entre le déchet bitumé et le fût métallique le contenant permettrait de faciliter les opérations de traitement. La conception du four d'incinération pourrait éventuellement permettre de s'en affranchir si cette séparation s'avérait trop délicate. Deux options ont été évaluées, incluant une congélation préalable des fûts de déchets bitumés :

- cryobroyage dans un broyeur à cisailles rotatives à vitesse modérée assurant le broyage de l'ensemble du fût avec décollage du bitume de l'acier des fûts, suivi d'une séparation acier/bitume par tamisage,
- cryobroyage dans 4 équipements en série pour obtenir une granulométrie maîtrisée : 2 broyeurs à couteaux (pour les fûts) et 2 broyeurs à plaques (pour le bitume), sans séparation fût/bitume.

L'incinération est réalisée dans un four rotatif continu, à une température n'excédant pas 800°C. Un revêtement métallique (plutôt que céramique) doit permettre de limiter les rétentions. Un criblage en sortie de four permettrait de séparer les résidus d'incinération, des morceaux de fûts métalliques, si cette séparation n'a pas été réalisée en amont lors du pré-traitement.

Dans le cas de la vitrification, la fusion des cendres et mâchefers se fait en mélange avec de la fritte de verre, et est réalisée selon un procédé de type « in can » avec chauffage résistif ou par induction. La température visée est au minimum 1150°C voire 1300°C.

Quant à la cimentation, elle peut être réalisée selon un procédé à pale perdue ou mise en rotation du colis préalablement rempli de déchets et dans lequel le coulis a été injecté (procédé mis en œuvre à Centraco). Après maturation, les fûts de 500L sont fermés et immobilisés en CBFK.

Le traitement des gaz, commun à l'incinération et à la fusion, comporte plusieurs étapes successives : post combustion, refroidissement par circulation d'eau, filtre décolmatable (récupération des cendres riches en Cs pour réintroduction à l'étape de fusion ou cimentation), tour de lavage des gaz (SOx), filtre THE, Denox si besoin pour abattre les oxydes d'azote.

#### *IV.2.2. Principaux résultats des études de pré-faisabilité*

Dans le cas de la vitrification, l'installation produit environ 44 000 CSD ou 25 000 CSD+. Le fonctionnement de l'étape de vitrification étant de type batch, une augmentation de taille du conteneur permet d'optimiser la capacité en réduisant la fréquence des opérations d'accostage/désaccostage. Une hauteur de conteneur encore plus importante que le CSD+ pourrait être évaluée à titre d'optimisation, en fonction du mode de stockage retenu dans Cigéo (cf. § IV.4).

Dans le cas de la cimentation, la compatibilité des colis produits (conditionnés en CBFK) avec les spécifications actuelles du CSA a été évaluée sur la base d'une pré-analyse technique par famille. Cette analyse technique montre que l'activité massique en émetteurs alpha est généralement dimensionnante. La majorité des colis pris individuellement seraient directement compatibles avec les spécifications d'un stockage de surface de type CSA quel que soit le taux d'incorporation considéré (10 ou 15%). Dans certains cas, des assemblages de fûts pourraient être nécessaires pour atteindre le taux d'incorporation visé. Les études devront par la suite évaluer la compatibilité de l'inventaire avec la capacité radiologique totale du site de stockage : ce point est évoqué au § IV.4 en lien avec la date de mise en stockage.

L'installation produit environ 68 000 fûts de 500L chargés à 10%, ou 45 000 fûts de 500L chargés à 15%, soit respectivement de l'ordre de 17 000 et 11 300 CBFK.

L'exploitation est prévue en 5x8. Le procédé d'incinération fonctionne en continu, le pré-traitement et le conditionnement fonctionnent en batch. Sur la base des données disponibles, les estimations de capacité conduisent à un fonctionnement sur une durée de 20 ou 30 ans avec un seul four d'incinération mais 5 chaînes de vitrification et 3 lignes de broyage.

L'analyse préliminaire de sûreté propose comme pour la filière 1, une gestion de la criticité par la masse au niveau des opérations du procédé, avec instrumentation par compteurs neutrons et sondes gamma des équipements susceptibles d'accumulation et réalisation d'opérations périodiques de chasse matière. Le choix d'un procédé de vitrification de type « in can » et l'absence de réfractaire dans le four d'incinération sont des éléments facilitant la démonstration de maîtrise du risque de criticité. Les autres risques sont les mêmes que pour la filière 1.

L'essentiel de l'exploitation et de la maintenance sont réalisées en téléopération, avec les mêmes réserves que pour la filière 1. L'absence de réfractaires dans le four est un atout pour le nettoyage.

La génération d'effluents gazeux et liquides est similaire à la filière 1. Les déchets secondaires incluent cette fois les morceaux de fûts séparés du bitume.

#### *IV.2.3. Incertitudes et besoins de R&D*

Les principales incertitudes spécifiques à la filière 2 sont résumées ci-après :

- Risque de dispersion lors du broyage, voire de pyrophoricité ;
- Adéquation du cryobroyage avec l'introduction dans le procédé et le temps de séjour dans l'incinérateur (optimisation de la granulométrie) ;
- Définition de la séparation bitume/fût (au niveau du broyage, ou de l'incinérateur) ;
- Transfert du produit froid dans le four chaud : le procédé nécessite d'introduire dans un four à 800°C, un produit broyé à -20°C. Il existe un risque de réchauffement du bitume à l'approche du four, qui pose la question du mode de transfert associé à un changement d'état physique ;
- Comportement du bitume dans la 1<sup>ère</sup> zone du four : en fonction des phénomènes de décomposition du bitume lors de sa montée en température, on peut s'attendre à un comportement collant du bitume lors des 1<sup>ères</sup> étapes de chauffe, avec encrassement et colmatage possible du tube rotatif ;
- Un traitement des gaz spécifique est à développer, en tenant compte de ce produit particulier et des volumes à traiter : très fortes quantités d'organiques avec une charge minérale importante qui se décompose en température, génération de suies et produits volatils (gestion du césium à chaud, lors de l'étape d'incinération et encore davantage dans le cas de la vitrification) ;
- Validation des taux d'incorporation dans le cas de la cimentation ;
- Cadence des opérations successives, à la fois en terme de diagramme de temps nominal (temps de séjour) et de fréquence des opérations de chasse matière pour la maîtrise de la criticité, avec impact potentiel sur le nombre de lignes. En ce sens, une durée de 20 ans paraît optimiste.

Les besoins de R&D peuvent se décliner en 5 grandes thématiques :

1. Développement du procédé de cryobroyage des fûts ;
2. Faisabilité et performance du procédé d'incinération appliqué aux bitumes, développement et qualification ;
3. Développement du procédé de fusion ou cimentation ;
4. Faisabilité et performance du procédé de traitement des gaz ;
5. Définition et qualification du colis et de la matrice en lien avec l'entreposage et le stockage.

Les deux premiers points sont étroitement liés, d'une part car il faut définir la granulométrie optimale du déchet bitumé broyé, atteignable par un broyage industriel, et compatible avec l'incinération, d'autre part car le transfert du broyat froid vers le four chaud a été identifié comme un verrou à lever. Par ailleurs, le comportement rhéologique du bitume dans un four tournant a été identifié comme un autre point d'incertitude technique important. Aussi, un programme en plusieurs phases serait nécessaire, avec des prototypes d'abord à échelle réduite puis échelle 1.

La durée du programme peut être estimée à une quinzaine d'années.

### IV.3. Filière 3 : vaporeformage

#### IV.3.1. Principe

Les principales étapes du procédé sont représentées dans le diagramme fonctionnel Figure 5.

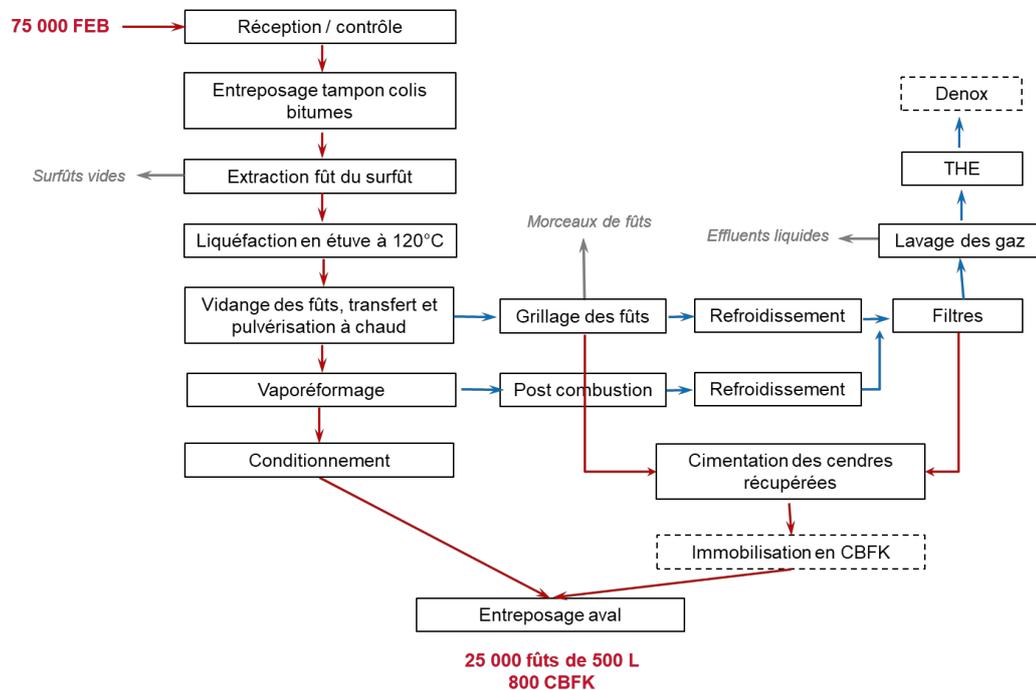


Figure 5 : diagramme fonctionnel du procédé filière 3

Le vaporeformage nécessite l'introduction d'un produit de granulométrie maîtrisée et surtout inférieure au mm. Cette performance est considérée comme très difficile à atteindre avec des broyeurs industriels. De plus, la présence de métal (issu des fûts) induirait des perturbations du lit fluidisé, d'où la nécessité d'une séparation préalable bitume/métal. Pour ces raisons, il a été considéré que le prétraitement à froid n'est pas adapté à la technologie de vaporeformage. L'option retenue est une liquéfaction du bitume à une température inférieure à 120°C. Cette liquéfaction est réalisée en autoclaves : le bitume fluidifié est pompé directement dans les fûts et transféré vers le procédé via des lignes maintenues en température pour éviter tout risque de bouchage. Ce choix de procédé requiert des caractéristiques physico-chimiques (viscosité) du bitume homogènes et constantes au moins sur chaque période de production.

Le fût contient une quantité résiduelle de bitume qui devra être minimisée. Un grillage de l'ensemble est prévu dans un four. Le fût résultant est destiné au stockage de surface après compactage, tandis que les cendres récupérées seront cimentées spécifiquement.

Le vaporeformage est un traitement thermochimique permettant la transformation de solides combustibles carbonés ou organiques en présence d'un réactif gazeux et produisant des cendres ou du gaz de synthèse. Sa spécificité est de produire un composé solide de propriétés chimiques maîtrisées, de granulométrie inférieure au mm, et potentiellement directement compatible avec un stockage ou ne nécessitant qu'un apport limité de réactif. Le taux de destruction des organiques est très bon. Un fonctionnement en lit fluidisé (billes de céramique) à 800°C a été retenu, avec ajout d'argile sous forme de suspension. Le bitume est alimenté par pulvérisation. L'injection de vapeur

d'eau surchauffée induit des réactions endothermiques. Les résidus solides (espèces minérales piégeant l'activité) sont récupérés en continu en partie basse du réacteur.

La nature et la quantité du résidu formé après vaporeformage seront à définir par une phase de R&D. En première approche et sur la base de la littérature, les études ont retenu un ratio de 70% entre le résidu final et la masse de déchet bitumé initiale. L'alimentation du réacteur s'effectue à une cadence de 150 kg/h.

Le vaporeformage s'apparentant à de la pré-cimentation, seule une immobilisation du résidu est nécessaire a priori. Un taux d'incorporation de 60% massique a été retenu sur la base de la littérature. Au stade actuel des études de procédé, il y a une grande incertitude sur le volume final des résidus conditionnés. Une autre voie est peut-être possible avec une solidification directe du produit sortant du vaporeformage conduisant à une réduction du volume final.

L'opération est réalisée par mise en rotation du colis préalablement rempli de déchets et adjuvant.

Pour les résidus issus du traitement des gaz et du grillage des résidus restant dans les fûts, un taux d'incorporation de 15% massique est retenu en première approche. Un procédé de cimentation est mis en œuvre comme pour la filière 2.

Le traitement des gaz comporte des étapes successives de post combustion, refroidissement par circulation d'eau, filtres à manche et THE (récupération des cendres contenant du Cs), lavage des gaz à la soude pour piéger l'iode et les sulfates, charbon actif (éventuel) et Denox (traitement de l'azote de combustion). Le césium récupéré est cimenté spécifiquement (avec les cendres issues du grillage des fûts). Les gaz issus du grillage des fûts sont refroidis puis rejoignent le traitement principal avant les filtres.

#### *IV.3.2. Principaux résultats des études de pré-faisabilité*

L'installation produit environ 25 000 fûts de 500L (non compatibles avec un stockage de surface du fait du taux d'incorporation élevé considéré et ainsi destinés au stockage profond) et 3 000 fûts de 500L de type FMA-VC (ensuite conditionnés dans des CBFK).

Le prétraitement est fait en 5x8 sur 7 autoclaves, dont un en secours. Le vaporeformage fonctionne en continu 20h/24 7j/7, avec une seule ligne. Le conditionnement final des résidus du vaporeformage est réalisé sur une ligne en 2x8 ou deux lignes en horaires normaux (HN), auxquelles s'ajoute une ligne pour la cimentation des cendres issues du grillage et du traitement des gaz.

La gestion de la criticité est assurée par la masse, avec instrumentation par compteurs neutrons et sondes gamma des équipements susceptibles d'accumulation et réalisation d'opérations périodiques de chasse matière. L'accumulation de matière fissile dans le four est limitée par l'utilisation de matériau métallique et non de réfractaire.

La mise en œuvre de réactions endothermiques permet l'arrêt du système par simple interruption de la chauffe (pas de risque d'emballement).

Une démonstration de sûreté spécifique est à prévoir pour la liquéfaction.

Les autres risques (dissémination, hydrogène) sont similaires aux deux autres filières.

#### *IV.3.3. Incertitudes et besoins de R&D*

Les principales incertitudes spécifiques à la filière 3 sont résumées ci-après :

- Gestion de la sûreté associée à l'étape de liquéfaction : la démonstration du risque incendie sera délicate au vu des discussions en cours sur le comportement des fûts de déchets bitumés. Les études réalisées se sont basées sur une mise en œuvre à 120°C, mais l'expérience acquise au CEA indique que cela risque d'être insuffisant pour assurer une liquéfaction suffisante du bitume chargé en sels et sa pulvérisation ;
- Obturation des lignes de transfert : des dépôts dans les lignes et des bouchages risquent de se produire pour différentes raisons : maîtrise insuffisante de la température, sédimentation des sels en suspension, adaptation à la composition et aux propriétés physiques (viscosité) ;
- Difficulté à développer des buses d'injection maintenables en téléopération ;
- Maîtrise de la criticité (risque sur le nombre de lignes) ;
- Mise au point d'un traitement des gaz spécifique, en tenant compte de ce produit particulier et des volumes à traiter ;
- Nature des additifs lors de la phase de vaporeformage, composition du produit de sortie, prise en compte de la variabilité des fûts de déchets bitumés en terme de composition ;
- Nature des additifs lors de la phase de conditionnement et composition du colis final, avec une forte incertitude sur le facteur de réduction volumique et donc le nombre de colis en résultant ;
- Cadence des différentes opérations.

Le niveau de maturité de cette filière est nettement moindre que celui des deux autres. Un programme de R&D complet est à mener pour définir le procédé (développement du réacteur, conditions opératoires...), développer la formulation du résidu et son conditionnement, développer et nucléariser la liquéfaction...

#### **IV.4. Colis issus du traitement et options de stockage**

Les natures et quantités de colis issus du traitement, y compris les déchets secondaires, sont résumés dans le Tableau 1 pour chaque filière de traitement. Ils sont basés sur les hypothèses suivantes :

- 75 000 fûts de déchets bitumés de 220L remplis à 80%,
- Vitrification : facteur de concentration volumique (FCV) de 2,
- Cimentation : taux d'incorporation 10 ou 15% massique des résidus dans des fûts de volume utile 500L, pour une charge massique initiale de 40% en sels dans les fûts de déchets bitumés.

Le procédé de vitrification conduit à concentrer l'activité dans les colis finaux : l'exutoire retenu ici, sans analyse plus détaillée, est le stockage profond.

A l'inverse, le procédé de cimentation, pour lequel la physico-chimie limite le taux d'incorporation, conduit à une activité moyenne des colis plus faible que dans les fûts d'origine. Pour la filière 2, les colis produits pris individuellement pourraient en première approche avoir pour exutoire un stockage de surface, de type CSA (cf. § IV.2.2). Si la totalité de ces colis ne s'avérait pas compatible avec un stockage en surface (par exemple du fait d'une activité alpha totale trop élevée), le stockage en sous-surface (stockage de type FA-VL) pourrait être envisagé.

Pour la filière 3, à ce stade, sans analyse plus détaillée (et notamment en lien avec la date à laquelle le traitement serait effectué), l'hypothèse retenue est que les colis les plus actifs (25 000 fûts de 500L) seraient dirigés vers le stockage profond et qu'une proportion des colis produits relèveraient d'un stockage de surface, de type CSA.

<b>Exutoire</b>	<b>Nature</b>	<b>Filière 1</b> incinération- vitrification	<b>Filière 2</b> combustion et cimentation	<b>Filière 2</b> combustion et vitrification	<b>Filière 3</b> vaporeformage et cimentation
Stockage profond	verres ou résidus de vaporeformage	35 000 CSD+	-	44 000 CSD ou 25 000 CSD+	25 000 fûts de 500L
Stockage de surface type CSA	colis cimentés fûts / déchets technologiques	2 150 m <sup>3</sup> de déchets secondaires	11 300 ou 17 000 CBFK selon le taux d'incorporation (10% ou 15%) + 6 000 m <sup>3</sup> de déchets secondaires	6 000 m <sup>3</sup> de déchets secondaires	800 CBFK + 6 000 m <sup>3</sup> de déchets secondaires
TFA	surfûts	2 500 m <sup>3</sup>	2 500 m <sup>3</sup>	2 500 m <sup>3</sup>	2 500 m <sup>3</sup>

**Tableau 1** : Quantité de colis issus du traitement et à destination des différentes filières de stockage

Pour les colis issus du traitement destinés au stockage profond, plusieurs options de stockage sont possibles :

- un stockage en alvéoles MA-VL, colis primaires placés en conteneur de stockage ou stockage direct des colis primaires (étant entendu que les futurs colis primaires seraient conçus de sorte à respecter les spécifications associées) ;
- un stockage dans les espaces intercalaires vides des alvéoles HA pour les colis vitrifiés<sup>2</sup> : le stockage de colis de type CSD requiert une mise en surconteneur préalable, opération à réaliser sur Cigéo (au même titre que pour les colis HA) ; l'utilisation d'une géométrie de colis au plus proche du diamètre du surconteneur (cas des CSD+) permet d'éviter cette opération tout en optimisant la quantité de colis stockés.

Dans le premier cas, le stockage des colis en zone MA-VL mobiliserait, selon la filière de traitement et selon le conditionnement retenu, entre un et quatre alvéoles.

Dans le second cas, il est considéré que le stockage de colis vitrifiés en zone HA serait réalisé sans modification de configuration donc sans construction d'alvéole HA supplémentaire. Au stade actuel des études, la configuration du quartier HA limite la capacité d'accueil des colis issus du traitement. Si le dimensionnement ne permet pas l'accueil de la totalité des colis produits par le traitement, le reste serait stocké en zone MA-VL.

<sup>2</sup> Pour mémoire, les colis HA doivent être espacés pour respecter les contraintes imposées par le dimensionnement thermohydraulique (THM). Ce dimensionnement THM conduit à une architecture de la zone HA définie par un jeu de données : espacement entre colis dans l'alvéole, espacement entre alvéoles.

## IV.5. Intégration globale

### IV.5.1. Les scénarios de gestion pour un traitement de l'ensemble des fûts de déchets bitumés

Les scénarios possibles dans le cas d'un traitement sont nombreux. L'objet de ce paragraphe n'est pas d'en donner une liste exhaustive, mais de présenter certains scénarios possibles en fonction des choix techniques qui seront faits pour la gestion des déchets bitumés.

Les options possibles diffèrent selon notamment :

- Le produit du traitement : colis de verre ou colis cimenté, avec les variantes pré-citées sur la géométrie et le taux d'incorporation,
- La catégorie du déchet produit (compatibles stockage en surface, projet FA-VL et Cigéo),
- Le mode de stockage dans Cigéo des colis issus du traitement (zone HA/MA-VL),
- La chronique associée au traitement et au stockage qui régit celle des autres opérations (durées d'entreposage, transports...).

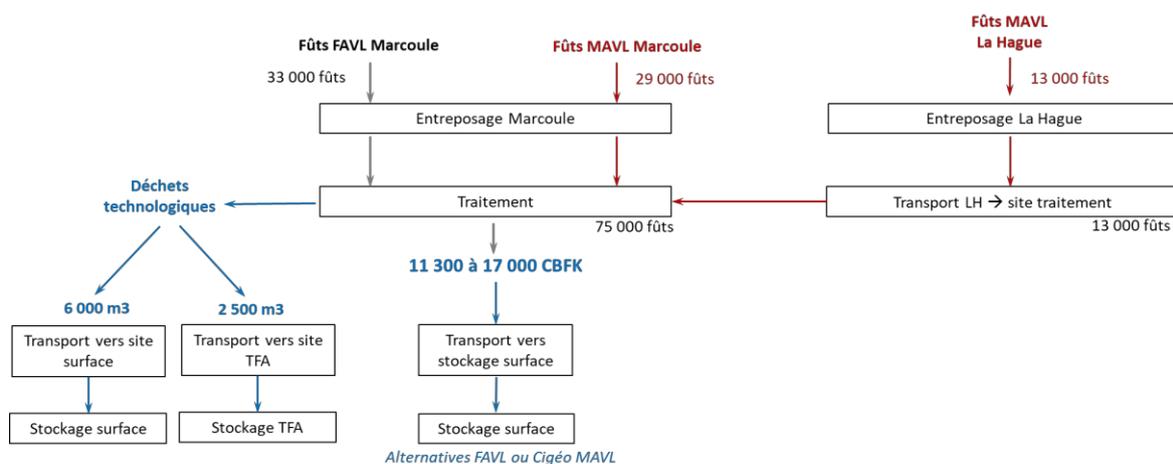
Dans cette partie, les filières décrites précédemment ne sont plus distinguées, même si elles présentent des spécificités en termes de technique et de maturité. A des fins de simplification, on différenciera uniquement la production de colis cimentés, et la production de colis vitrifiés (de type CSD+ issus de la filière 2, la plus optimisée en termes de produit à stocker, ou de type CSD), dans la mesure où ce choix est très impactant en particulier pour les étapes de transport et stockage.

Le transport des fûts de déchets bitumés vers l'installation de traitement est commun à ces deux familles d'options. Les besoins en transport sont fonction de l'hypothèse de localisation de l'usine. Pour des raisons de simplification, dans ce rapport, c'est le cas d'une implantation à Marcoule de l'usine de traitement qui est illustré. Ceci nécessite un transport des fûts de La Hague vers Marcoule, puis un transport des colis issus du traitement vers le site de stockage.

La référence de conception de Cigéo prévoit une expédition en transport de type B pour l'ensemble des fûts de déchets bitumés de La Hague et Marcoule, par voie ferroviaire. On considère ici [4] une expédition des fûts de La Hague en emballage de type TN833 contenant 12 fûts[10][11].

#### IV.5.1.1 Cas d'une cimentation

Le scénario global avec cimentation des résidus de traitement est représenté de façon simplifiée **Figure 6** : scénario traitement avec cimentation, sans notion de chronique.



**Figure 6** : scénario traitement avec cimentation

Ce scénario requiert donc :

- L'entreposage des fûts de déchets bitumés à Marcoule et La Hague sur une durée qui dépend de la chronique retenue,
- Le transport des fûts de La Hague vers Marcoule : en référence le transport vers Cigéo est prévu par voie ferroviaire, il devrait en être de même pour celui-ci,
- Le traitement des 75 000 fûts, conduisant à la production de 11 300 à 17 000 CBFK, selon le taux d'incorporation obtenu,
- Le transport de ces CBFK vers le site de stockage : il a été considéré ici que ce type de transport pourrait être effectué de façon banale en IP2. L'expédition des colis serait réalisée en ligne, ne nécessitant pas de capacité d'entreposage supplémentaire,
- Le stockage en surface des colis cimentés produits (sous réserve de compatibilité comme précédemment évoqué),
- Le transport (type IP2 également) et le stockage en surface des déchets technologiques FMA-VC et TFA.

Compte tenu des besoins de R&D identifiés pour le traitement (programme estimé à une quinzaine d'années), et des phases de conception, construction et essais nécessaires avant mise en service (de l'ordre de 10 ans au moins), le traitement ne pourrait démarrer avant 2045. Cette date est d'ailleurs cohérente avec les conclusions de la revue externe [2] : «... *Il semble toutefois improbable que la mise en service d'une installation de traitement puisse intervenir avant 2040* ». Sa durée est estimée à 20 ans au minimum voire 30. La durée d'entreposage des fûts de déchets bitumés dépend de la date de mise en service effectivement prise en compte.

L'évaluation des différents postes montre que :

- L'entreposage des fûts de déchets bitumés est actuellement réalisé dans des conditions de sûreté maîtrisées, les scénarios discutés ne remettent pas en cause la stratégie actuelle ;
- Le transport de fûts de déchets bitumés en emballages type B est tout à fait envisageable industriellement, comme explicité dans les rapports [10][11] : les analyses menées par Orano et le CEA montrent que la disponibilité d'un emballage type B adapté serait atteignable industriellement dès 2030 et donc bien avant la date du besoin. Le transport type IP2 de fûts mis par 4 en conteneurs CBFK est déjà réalisé industriellement par le CEA depuis Marcoule vers le Centre de Stockage de l'Aube, la démonstration de sûreté devra être adaptée à un transport de type B sans point dur identifié ;
- Le transport de colis cimentés, conditionnés en CBFK, est une opération banale qui ne pose pas de problème de sûreté spécifique.

Les principales incertitudes associées à ces scénarios concernent principalement :

- La faisabilité industrielle du traitement, comme discuté dans les parties précédentes, même si aucun point rédhibitoire n'a été identifié jusqu'alors ;
- La définition de l'inventaire à traiter comme évoqué au § III.1 ;
- L'acceptabilité des colis cimentés en stockage de surface. Pour pallier ce risque, des voies de repli sont envisagées avec un stockage en site FA-VL, voire à Cigéo.

#### *IV.5.1.2. Cas d'une vitrification*

Le scénario global avec vitrification des résidus de traitement est représenté de façon simplifiée Figure 7, sans notion de chronique.

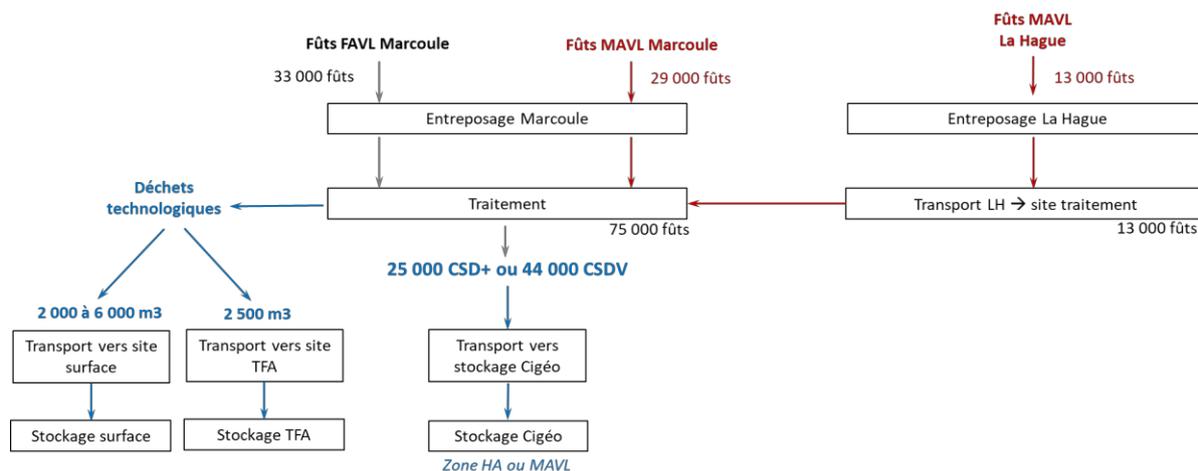


Figure 7 : scénario traitement avec vitrification

Ce scénario requiert donc :

- L'entreposage des fûts de déchets bitumés à Marcoule et La Hague sur une durée qui dépend de la chronique retenue,
- Le transport des fûts de La Hague vers Marcoule,
- Le traitement des 75 000 fûts, conduisant à la production de 25 000 CSD+ ou 44 000 CSD,
- L'entreposage de ces colis vitrifiés, un découplage avec le site de stockage profond apparaissant nécessaire : avec l'hypothèse d'une usine de traitement localisée à Marcoule, il a été considéré que les entreposages existants, actuellement dédiés aux fûts de bitumes, pourraient être réutilisés aux fins d'entreposage des colis produits.
- Le transport de ces colis vitrifiés vers le site de stockage : de même que pour les colis bitumés, il s'agirait ici d'un transport de type B (par exemple, 16 CSD+ ou 28 CSD dans un emballage de type TN28),
- Le stockage en profond des colis, en zone MA-VL et/ou HA,
- Le transport (type IP2) et le stockage en surface des déchets technologiques FMA-VC et TFA.

Comme exposé au §IV.1.1 pour la cimentation, les besoins de R&D et d'études impliquent un démarrage d'une installation de traitement à l'horizon 2045 au mieux. Sa durée est estimée à 20 ans au minimum, voire 30 ans, la vitrification étant potentiellement moins capacitive que la cimentation.

De façon générale le planning actuel du projet Cigéo prévoit le stockage des déchets MA-VL jusqu'en 2095 environ. Dès lors, de nombreux scénarios sont possibles pour un stockage en zone MA-VL des verres issus du traitement, par exemple :

- Traitement au plus tôt (2045) et stockage dans la continuité, de 2050 à 2075 ;
- Stockage en fin de période MA-VL (2070-2095) et traitement en cohérence, de 2055 à 2075.

Selon les hypothèses actuelles de mise en stockage des déchets HA, le stockage en zone HA des colis vitrifiés issus du traitement ne peut intervenir au mieux qu'à l'horizon 2100. Cela donne une longue période pendant laquelle peut être réalisé le traitement, par exemple :

- un traitement au plus tôt, dès 2045, impliquant un entreposage des verres produits pendant plusieurs décennies ;
- un traitement au plus tard, autorisant un décalage important de l'investissement, et laissant du temps au processus de choix de la meilleure option.

L'évaluation des différents postes montre que :

- L'entreposage des fûts de déchets bitumés est actuellement réalisé dans des conditions de sûreté maîtrisées. Certains des scénarios évoqués ici positionnent le traitement à la fin du siècle, allongeant significativement la durée d'entreposage des bitumes avant traitement. Les entreposages actuels ou à venir sont conçus pour fonctionner plusieurs décennies et soumis régulièrement à des réexamens de sûreté qui garantissent la sûreté des installations ;
- Le transport des fûts en emballages type B est tout à fait envisageable industriellement, comme explicité précédemment ;
- Le transport de colis vitrifiés est déjà maîtrisé, pour des niveaux d'activité nettement plus élevés que celui des colis issus du traitement des fûts de déchets bitumés ;
- Le stockage des colis vitrifiés à Cigéo ne pose pas de problème technique ou de sûreté spécifique.

Les principales incertitudes associées à ces scénarios concernent :

- La faisabilité industrielle du traitement et sa date de disponibilité, comme discuté dans les parties précédentes, même si aucun point réhibitoire n'a été identifié jusqu'alors ;
- La définition de l'inventaire à traiter.

#### *IV.5.2. Impact d'un traitement partiel*

Les études décrites précédemment ont porté sur le traitement de la totalité des fûts de déchets bitumés. La question d'un traitement partiel se pose, pour différentes raisons :

- Il pourrait être envisagé de traiter seulement les fûts de déchets bitumés aujourd'hui identifiés MA-VL et destinés à Cigéo, soit environ 42 000 fûts, les autres (33 000 fûts de l'inventaire de réserve de Cigéo) étant destinés à un stockage en l'état en sub-surface. Le passage de 75 000 à 42 000 ne remet pas en cause le choix du procédé. Le coût du traitement en serait réduit mais de façon non proportionnelle au nombre de fûts à traiter compte tenu des coûts fixes (CAPEX des installations à construire) à prévoir de toute façon.
- Dans l'hypothèse d'un stockage dans Cigéo des fûts de déchets bitumés en l'état, il n'est pas possible d'exclure qu'une fraction minoritaire des fûts de déchets bitumés puisse ne pas être acceptée à Cigéo, par exemple en raison d'une caractérisation estimée insuffisante. Ce point est soulevé dans les conclusions de la revue externe [2] : « *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 satisfaire aux critères d'acceptation qui seront définis et doivent donc faire l'objet d'un traitement particulier* ». En-dessous d'un certain seuil, le choix du procédé de traitement pourrait être à revoir, la voie thermique n'étant pas forcément adaptée à un faible flux. Ainsi la voie de dissolution par solvant, non retenue lors des étapes précédentes [4] notamment pour des raisons de quantités de solvant à mettre en œuvre à l'échelle des 75 000 fûts, pourrait être réévaluée.
- Enfin, comme évoqué précédemment, le CEA caractérise les fûts d'enrobés bitumés lors de leur reprise. Grâce à ces études complémentaires, le CEA évalue en lien avec l'Andra, la possibilité de faire évoluer la répartition entre les fûts de déchets bitumés MA-VL et FA-VL, susceptible de réduire significativement l'inventaire de référence MA-VL. En considérant que le concept de stockage FA-VL autorise un stockage en l'état des fûts FA-VL (cf. § V.2), le flux à traiter pourrait être réduit, nécessitant de même une réflexion sur le procédé le plus adapté.

Ces scénarios n'ont pas été évalués de façon approfondie.

## V. SCENARIOS DE STOCKAGE EN L'ETAT DES COLIS DE DECHETS BITUMES

### V.1. Stockage des déchets bitumés MA-VL en l'état dans Cigéo

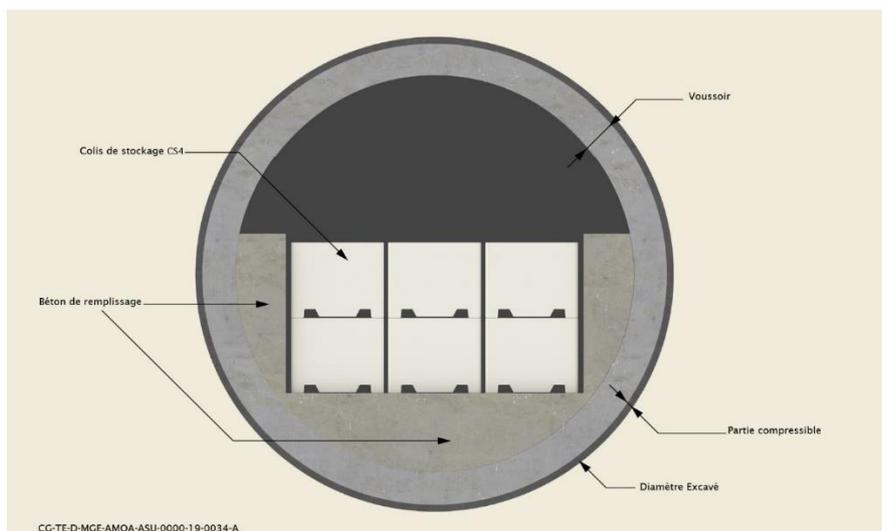
En réponse aux demandes de l'ASN issues de l'instruction du DOS de Cigéo, l'Andra étudie des évolutions de conception pour exclure le risque d'emballlement de réactions exothermiques.

Compte-tenu des travaux de caractérisation des bitumes encore à mener pour préciser les hypothèses qui seraient à prendre en compte dans la conception du stockage, l'objet de ces études n'est pas de produire une conception de référence mais de montrer que même en prenant en compte des paramètres particulièrement enveloppe et pénalisants, une démonstration de sûreté associée à un stockage en l'état est accessible. Ces études réalisées dans le cadre de la démonstration préliminaire de sûreté associée au dossier de DAC concernent des options de conception renforcées visant à exclure le risque d'emballlement de réactions exothermiques, y compris avec des hypothèses pénalisantes. Les progrès à venir sur la connaissance du comportement des enrobés bitumineux seront susceptibles de faire évoluer l'approche enveloppe initialement mise en avant dans la démonstration préliminaire de sûreté.

L'option présentée ici est celle retenue dans la note [7] en réponse à l'article 46 second alinéa de l'arrêté PNGMDR de février 2017[7]. Elle propose des dispositions complémentaires permettant, y compris en prenant en compte des hypothèses pénalisantes :

- dans le cas d'un incendie en alvéole, d'éteindre cet incendie, et de surveiller l'état thermique des fûts de déchets bitumés, afin de démontrer le caractère hautement improbable d'un emballlement d'un fût de déchets bitumés ;
- d'écarter le risque de propagation d'un emballlement entre les colis de stockage, dans le cas, postulé, d'emballlement d'un fût de déchets bitumés au sein d'un colis de stockage.

Par ailleurs, une évolution de l'agencement des colis de stockage des fûts de déchets bitumés en alvéole de stockage MA-VL serait réalisée sur deux niveaux, au lieu de trois, afin de disposer d'un espace permettant notamment de faciliter les interventions (Figure 8).



**Figure 8** : Illustration de la proposition de remplissage des alvéoles dédiées aux colis de stockage de déchets bitumés en l'état

Des dispositions complémentaires envisagées par ailleurs pour renforcer la capacité à surveiller et à intervenir en cas d'événement (incendie, emballlement) seraient notamment les suivantes :

- Systèmes de détection et système d'extinction complémentaires en alvéole, pour assurer l'extinction d'un incendie se développant sur le pont stockeur ;
- Système de surveillance de la température ambiante autour des colis de stockage, pour s'assurer de leur bon comportement et détecter toute dérive ;
- Moyens mobiles acheminés en alvéole, pour surveiller/vérifier l'état des colis de stockage, pour effectuer des opérations d'intervention (extinction/protection) ;
- Moyen de manutention complémentaire, assurant un retrait de colis de stockage en un lieu quelconque de l'alvéole ;
- Qualification des fonctions de protection du conteneur de stockage, à la pression, à l'explosion et au feu interne, pour éviter la propagation d'un emballement entre colis de stockage.

L'intérêt du conteneur béton au titre du compartimentage est confirmé. Les nouvelles simulations incendie et les essais récents effectués sur l'explosion apportent des éléments sur son efficacité, pour d'une part assurer la protection thermique des fûts de déchets bitumés qu'il contient en cas de sollicitation thermique externe, et d'autre part jouer un rôle de compartimentage pour limiter les effets d'un emballement sur un fût de déchets bitumés sur les colis de stockage voisins. D'autres évaluations et essais sont prévus pour conforter ces éléments, suivant en cela les recommandations de la revue externe bitumes [2] sur la valorisation du rôle du conteneur dans la démonstration de sûreté afin de privilégier les lignes de défense reposant sur des dispositifs passifs.

A ce stade, la faisabilité technique de l'ensemble de ces dispositions complémentaires semble accessible même si des études complémentaires restent à mener.

De manière plus globale, les conclusions de la revue externe [2] soulignent des progrès significatifs du dossier et un bon niveau de confiance sur l'atteinte d'une démonstration de sûreté convaincante : « *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.* »

La démonstration de sûreté d'un stockage des déchets bitumés en l'état à Cigéo en situation d'incendie s'appuie aussi sur la connaissance des bitumes et de leur comportement lors d'une montée en température. Cette connaissance peut en particulier être renforcée par les études et essais complémentaires suivants, en lien avec les recommandations de la revue externe :

- Mieux appréhender les faibles fluctuations visibles sur les thermogrammes entre 100 et 150°C et montrer qu'elles restent très inférieures à la limite de 5 mW/g : « *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* » ;
- Couvrir la variabilité de composition des sels : « *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.* » ;
- Consolider la validation des codes de calcul utilisés pour prédire le comportement thermique d'un fût d'enrobé bitumé : « *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 ».*

Un programme d'essais et d'études complémentaires est en cours d'élaboration.

Dans le cadre de la voie de stockage des enrobés bitumés en l'état, la démarche de sûreté pourra ainsi être réévaluée au regard des compléments de connaissances acquis et constituera la base de la conception qui sera in fine retenue.

## **V.2. Stockage des déchets bitumés FA-VL**

Le rapport d'étape remis en 2015 par l'Andra [8] a esquissé les contours d'un possible projet de centre de stockage à faible profondeur sur le site investigué sur la communauté de Vendoeuvre-Soulaines, fondé sur l'inventaire de déchets considéré à l'époque (bitumes mais aussi graphites et radifères). Deux types de concepts avaient été étudiés : par terrassement depuis la surface (Sous Couverture Remaniée, SCR) et creusement en galeries souterraines (Sous Couverture Intacte, SCI). L'avis N° 2016-AV-264 de l'ASN remis le 29 mars 2016 a conclu notamment qu'un projet développé sur le site investigué dans l'Aube ne pourrait accueillir qu'une part de l'inventaire envisagé, cette part restant à préciser, et que corolairement des solutions complémentaires devraient être proposées pour les déchets non pris en compte. Suite à cet avis, le PNGMDR 2016-2018 demande à l'Andra d'avancer dans la conception d'un stockage à faible profondeur pour les déchets FA-VL sur le site déjà investigué, d'explorer les modalités de recherche d'un deuxième site, puis, dans un deuxième temps, de construire un schéma industriel d'ensemble pour la gestion des déchets FA-VL. Ces travaux sont en cours et ont fait, pour partie, l'objet de la note [9] remise en mai 2019.

S'agissant des déchets bitumés, la conception de leur stockage pourrait être adaptée pour intégrer la problématique spécifique du risque incendie en exploitation : la gestion de ce risque dépend notamment de l'option de réalisation retenue pour leur stockage (depuis la surface avec des conditions facilitant la maîtrise du risque incendie, ou en souterrain). Les aspects sûreté après fermeture devront être évalués comme pour le stockage profond.

L'avancement du projet ne permet pas d'avancer une date de mise en service, laquelle ne saurait être positionnée avant 2040.

## **V.3. Intégration globale**

Le scénario global correspondant au stockage en l'état est représenté de façon simplifiée [Figure 9](#), sans notion de chronique.

Pour la fraction de fûts de déchets bitumés MA-VL, ce scénario requiert donc :

- L'entreposage des fûts de déchets bitumés de l'inventaire de référence de Cigéo à Marcoule et La Hague sur une durée en lien avec la chronique d'envoi retenue (au-delà de la première tranche, entre 2050 et 2095) ; ce sujet est maîtrisé ;
- Le transport des fûts de déchets bitumés de La Hague et Marcoule vers Cigéo (en emballage de transport de type B) ; ce sujet est également maîtrisé comme discuté au § IV.5 ;
- Le stockage sur Cigéo des colis de déchets bitumés en alvéole MA-VL.

Pour la fraction de fûts de déchets bitumés FA-VL, les étapes sont les suivantes :

- L'entreposage des fûts de déchets bitumés à Marcoule sur une durée qui dépendra de la chronique d'envoi vers un site FA-VL,
- Le conditionnement des fûts de déchets bitumés (à ce stade envisagé en CBFK par 4), dans une installation existante ou à construire,

- Le transport des CBFK de Marcoules (considéré de type IP2 de même que les fûts de déchets bitumés actuellement expédiés industriellement au CSA dans les mêmes types de conteneurs),
- Le stockage sur un futur centre de stockage FA-VL.

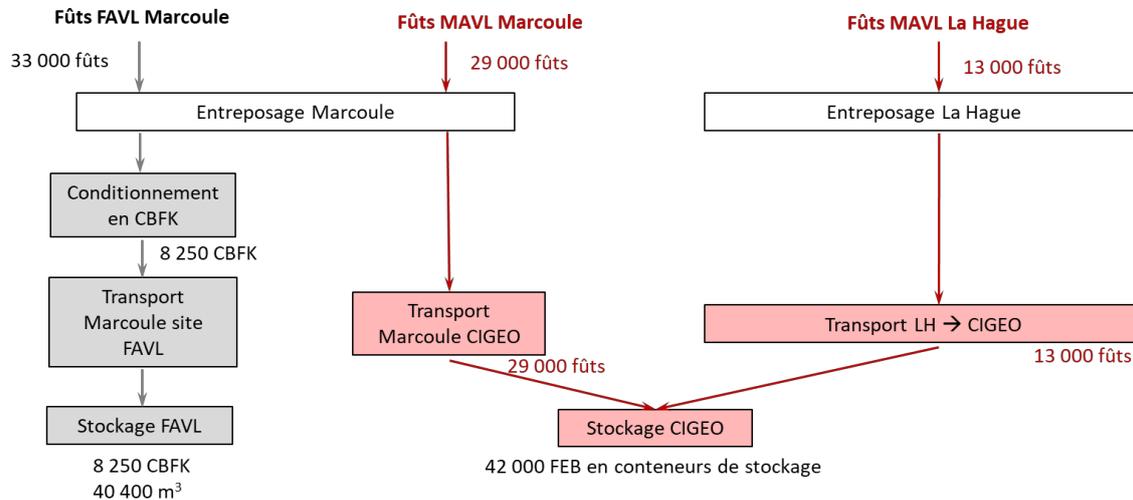


Figure 9 : scénario de stockage en l'état

Outre l'acceptabilité des déchets bitumés en stockage Cigéo et FA-VL (§V.1 et V.2), d'autres aspects sont à prendre en considération :

- L'entreposage des fûts de déchets bitumés est actuellement réalisé dans des conditions de sûreté maîtrisées, les scénarios discutés ne remettent pas en cause la stratégie actuelle et ne nécessitent pas leur renouvellement ;
- Le conditionnement des fûts de déchets bitumés en CBFK est une opération de routine, déjà réalisée actuellement dans l'installation CDS de Marcoules à raison de 1 ou 2 fûts de déchets bitumés par CBFK ;
- Le transport de fûts de déchets bitumés conditionnés en CBFK est actuellement réalisé vers le centre de stockage de l'Aube. Les scénarios évoqués conduisent à augmenter le flux correspondant sans remise en cause des principes.

Hormis une partie des incertitudes listées au V.1 sur le stockage en l'état, la principale incertitude associée à ce scénario réside donc dans l'aboutissement du projet FA-VL, la date de disponibilité du stockage, et les conditions de prise en charge des enrobés bitumés dans un tel stockage. Cette incertitude est prise en compte par l'intégration des bitumes FA-VL dans l'inventaire de réserve de Cigéo.

## VI. ELEMENTS D'ANALYSE DES SCENARIOS

Comme proposé au §III, l'objet de cette partie est d'amorcer une analyse comparative (limitée, à ce stade d'avancement des études) des différentes voies de gestion des déchets bitumés, selon les trois critères de maturité technique, sûreté et impact environnemental, et coût.

### VI.1. Maturité technique

Pour le traitement des déchets bitumés, les incertitudes principales concernent la faisabilité industrielle du procédé de traitement lui-même. Celles-ci sont importantes même si aucun point réhibitoire n'a été identifié à ce stade. Elles sont principalement relatives :

- à l'introduction d'un produit divisé dans un procédé chaud,
- au comportement du bitume en température,
- au traitement des gaz,
- à la maintenance et l'exploitation d'un procédé thermique en enceinte blindée.

Un programme de R&D conséquent, de l'ordre d'une quinzaine d'années, serait nécessaire.

Pour le stockage en l'état des enrobés bitumés, les incertitudes techniques concernent :

- le stockage en l'état des déchets bitumés MA-VL dans Cigéo, même si une démonstration de sûreté avec des hypothèses pénalisantes semble accessible en poursuivant l'étude des scénarios de sûreté, en lien avec les compléments de caractérisation des fûts de déchets bitumés ;
- la conception d'un stockage FA-VL et la compatibilité avec le site aujourd'hui identifié, le projet étant à un stade très préliminaire. Cette incertitude est gérée par l'identification des déchets bitumés FA-VL en inventaire de réserve de Cigéo.

Les autres étapes de gestion ne présentent pas d'incertitude forte.

Le stockage en l'état apparaît plus mature que les scénarios incluant un traitement, ce qui est cohérent avec le niveau de R&D et d'études menées sur chacune des voies. Il est donc susceptible d'aboutir plus rapidement. Ce constat est en cohérence avec les conclusions de la revue externe [2] : « *La maturité technique du dossier (d'un procédé de neutralisation) 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 [...]* 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 ».

### VI.2. Sûreté et impact environnemental

La sûreté et l'impact environnemental sont à regarder à toutes les étapes de gestion des fûts de déchets bitumés.

A ce jour, la démonstration de sûreté en entreposage est acquise. La principale différence entre les scénarios de traitement et stockage en l'état concerne la durée d'entreposage, et elle dépend de la date de traitement : si la date de traitement est tardive (fin de siècle par exemple), de nouvelles capacités d'entreposage seront à envisager en fonction de la pérennité des installations d'entreposage actuelles. C'est également le cas s'il faut recourir à une longue période d'entreposage de colis vitrifiés avant stockage. Ces nouveaux entreposages ne devraient pas poser davantage de questions liées à la sûreté que ceux déjà en exploitation.

Les transports constituent une étape majeure dans les scénarios de gestion, en termes de démonstration de sûreté et d'impact. Le Tableau 2 quantifie en ordre de grandeur, les nombres de transports de chaque type, en fonction du scénario retenu. Il met en évidence une réduction importante en nombre de transports, obtenue avec un traitement par vitrification, induisant un gain significatif sur l'impact environnemental.

Transports vers le traitement et le stockage	Traitement avec vitrification	Traitement avec cimentation	Stockage en l'état
Transports en type B	2 800 m <sup>3</sup> de FEB + 9 000 m <sup>3</sup> de CSD+ 1 100 transports de FEB +2 000 transports de CSD+	2 800 m <sup>3</sup> 1 100 transports de FEB	14 000 m <sup>3</sup> 6 000 transports de FEB
Transports en IP2	-	57 000 à 85 000 m <sup>3</sup> 11 300 à 17 000 transports de CBFK	40 000 m <sup>3</sup> 8 000 transports de CBFK
Total	3 100 transports	12 000 à 18 000 transports	14 000 transports

Tableau 2 : Bilan des volumes transportés et nombres de transports selon les voies de gestion

Les études de sûreté associées au traitement sont restées à un stade très préliminaire. Les principaux risques identifiés à considérer sont relatifs à la criticité, à la radiolyse, et au confinement. Les procédés identifiés, tous de nature thermique, génèrent des rejets gazeux : CO<sub>2</sub> (de façon proportionnelle à la quantité de bitume traité), gaz nitrés et sulfatés, activité résiduelle (avec une conception du traitement des gaz qui permet le respect de la réglementation). Ils génèrent également des rejets provenant des effluents liquides à traiter, ainsi que des déchets secondaires, quantifiés dans les parties précédentes. La quantification des rejets, tant radioactifs que chimiques, qui seraient produits par une installation de traitement en conditions normales de fonctionnement comme en situation accidentelle, reste à faire. Par ailleurs ces procédés mettent en œuvre de nombreuses étapes de transformation qui pour la plupart sont téléopérées, donc minimisent l'exposition des travailleurs ; toutefois, elles induisent naturellement une dosimétrie supplémentaire par rapport à la voie de stockage en l'état et augmentent l'occurrence du risque de dissémination.

Dans le cas d'un stockage à Cigéo, les principaux risques à considérer concernent la sûreté en exploitation. Pour des colis vitrifiés après traitement, les risques sont ceux classiquement identifiés dans le cadre du projet Cigéo, du même niveau que tout autre colis de nature « inerte » et ne nécessitent pas d'analyse spécifique. Pour le stockage des déchets bitumés non traités, une démonstration spécifique enveloppe a été initiée, reposant à la fois sur la conception du stockage et sur la caractérisation des colis. Des besoins de compléments de caractérisation ont été identifiés à la suite des recommandations de la revue externe [2].

Enfin, le stockage en l'état induit une consommation de la ressource stockage profond notablement plus élevée (7 à 8 alvéoles pour les colis MA-VL, au lieu de 1 à 4 si des colis vitrifiés devaient être stockés en zone MA-VL).

### VI.3. Coût

Les paragraphes suivants présentent les principaux postes de coûts dans l'ordre décroissant en coûts bruts : traitement (poste majoritaire quelle que soit la filière considérée dans le scénario traitement), stockage, puis entreposage et transport.

Dans le cas des scénarios avec traitement, cette étape de traitement constitue le poste de coût majoritaire pour toutes les filières envisagées. L'étude présentée au PNGMDR de 2015 avait évalué le coût associé à 1,7Md€<sub>2015</sub>. Les incertitudes résultant des études de pré-faisabilité sont trop importantes pour afficher un chiffrage robuste. Il apparaît néanmoins que le chiffrage 2015 est à considérer comme minoré. Ceci est en accord avec les conclusions de la revue externe [2] : « *Compte tenu de ces incertitudes, les éléments de coût et de calendrier en cours de consolidation par le CEA devront être considérés avec une très grande prudence. Il semble toutefois improbable [...] que son coût soit significativement inférieur à l'estimation présentée par le CEA en 2015* ». En particulier les risques techniques, technologiques, de sûreté... associés à ce traitement doivent être pris en compte.

Le coût du stockage diffère significativement selon les scénarios retenus. Pour comparer différentes options, il faut raisonner en écarts de coûts par rapport à une référence, donc considérer le surcoût ajouté par les fûts de déchets bitumés quelle que soit leur forme. A ce stade il apparaît prématuré d'indiquer des valeurs absolues pour ces coûts. Il est toutefois possible d'indiquer les points suivants :

- le coût du stockage associé à un scénario avec traitement puis cimentation serait le plus faible dans la mesure aucun alvéole dédié aux déchets bitumés, quelle que soit leur forme, ne serait à prévoir dans Cigéo ;
- la vitrification produirait des colis susceptibles d'être positionnés soit en zone MA-VL (jusqu'à 4 alvéoles) soit en zone HA (pas d'alvéole supplémentaire) soit toute combinaison des deux. L'investissement induit est donc plus important dans l'option MA-VL, a contrario les coûts d'exploitation dans l'option MA-VL seraient plus faibles : (manutention par groupe de 4 ou 6, au lieu d'individuelle pour les HA), nécessité pour les HA d'utiliser un sur-conteneur de stockage, excepté si le colis vitrifié est un CSD+. La résultante, en coût brut, serait favorable au stockage en zone MA-VL.
- pour un stockage en l'état, le stockage des seuls bitumes MA-VL requiert un investissement de 7 à 8 alvéoles, auquel il convient d'ajouter les coûts d'exploitation, accrus par les dispositions de sûreté adoptées pour renforcer la démonstration de sûreté (surcoût global estimé à 50%). Au vu du volume occupé et des dispositions de conception renforcées, cette option est la plus coûteuse en valeur brute, sur le poste stockage qui est le poste majoritaire pour cette voie de gestion.

Le coût d'entreposage (exploitation et jouvence pour des entreposages existants, investissements complémentaires en cas de nouvelles constructions) est bien connu aujourd'hui mais dépend fortement de la chronique envisagée : il augmente mécaniquement avec la durée d'entreposage, donc avec une gestion tardive des bitumes. En ce sens qualitativement, les scénarios avec traitement tardif sont les plus coûteux.

Enfin, le coût de transport est différent selon le type de transport : un transport de type IP2, adapté pour transporter des colis cimentés ou des déchets technologiques, est moins cher qu'un transport de type B, d'un facteur de l'ordre de 100 si on le ramène au m<sup>3</sup> de déchet transporté. De fait, les scénarios les plus économiques sont ceux qui induisent le moins de transport de fûts de déchets bitumés et de colis vitrifiés. Le stockage en l'état est donc la voie la plus coûteuse, suivie des scénarios incluant un traitement avec vitrification pour une localisation optimisée (Marcoule). En cas de traitement avec cimentation, seuls les enrobés bitumés de La Hague nécessitent un transport en type B vers

l'installation de traitement, les colis cimentés issus du traitement étant considérés transportés en IP2 vers le centre de stockage.

En dépit des nombreuses incertitudes déjà mises en avant, l'analyse économique en valeur brute est plutôt en faveur du stockage en l'état. C'est d'ailleurs ce que conclut la revue externe sur la base des éléments à sa disposition : « *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* ».

Toutefois, comme évoqué précédemment, de nombreux scénarios de chroniques pour chaque segment (traitement, envoi à Cigéo...) sont possibles pour les deux voies. De fait, les coûts de gestion deviennent extrêmement sensibles à l'actualisation. Le niveau de robustesse des évaluations économiques, associé aux incertitudes sur les chroniques, ne permet pas d'être discriminant dans le choix de la voie à retenir.

## VII. CONCLUSION

L'objectif de ce rapport d'étape est d'apporter les premiers éléments de comparaison entre différents modes de traitement, de conditionnement et d'exutoires associés envisagés pour les déchets bitumés. Le champ des possibles étudiés implique notamment les options suivantes :

- traitement des colis de déchets bitumés (en vue de neutraliser leur réactivité) préalablement à leur mise en stockage ;
- stockage en l'état des déchets bitumés MA-VL dans Cigéo et des déchets bitumés FA-VL dans un stockage en sub-surface ;
- variantes impliquant une mixité des deux solutions (traitement et stockage en l'état) avec une évolution ou non de la répartition MA-VL / FA-VL.

En ce qui concerne le traitement, le rapport [4] avait identifié 3 filières de traitement pour assurer la neutralisation des fûts de déchets bitumés de Marcoule et de La Hague. Des études de pré-faisabilité industrielle ont été menées sur chacune d'elles pour en évaluer la pertinence technico-économique. Ces trois filières reposent toutes sur un procédé thermique associé à une mise en forme préalable et à un conditionnement par vitrification ou cimentation. Le présent rapport dresse le bilan de ces études :

- Le vaporeformage, associé à une alimentation par du bitume liquéfié à chaud et à un conditionnement spécifique à développer, présente aujourd'hui un niveau de maturité faible et de nombreuses incertitudes ;
- Les deux autres filières sont plus avancées : l'incinération-vitrification bénéficie des développements déjà réalisés sur le procédé PIVIC, et dans le cas de la combustion classique, le découplage des fonctions (incinération / conditionnement par cimentation ou vitrification) permet de s'appuyer sur des technologies déjà éprouvées hors nucléaire ;
- La cimentation apparaît industriellement plus simple de mise en œuvre que la vitrification et plus polyvalente en terme d'orientation vers les exutoires, mais le taux d'incorporation des résidus d'incinération dans une matrice cimentaire constitue un axe de R&D, qui pilote le volume de déchets produits et leur exutoire ;
- Le pré-traitement à froid (découpe ou concassage) préconisé dans les deux cas cités ci-dessus, constitue un verrou technologique important à lever ;
- Les spécificités du bitume conduisent toutefois à de nombreuses incertitudes techniques, notamment : application du procédé PIVIC au bitume (mode de chauffe), gestion du transfert d'un produit congelé vers le four et comportement du bitume collant dans le four d'incinération, nucléarisation et maintenance, traitement des gaz et impact environnemental, démonstration de sûreté-criticité...

L'ampleur des besoins d'études, 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 avant 2045. L'analyse détaillée de sûreté et d'impact environnemental ne pourrait être conduite que sur la base d'une meilleure définition des procédés, une fois que leur conception aura atteint un niveau de maturité suffisant. Ces conclusions sont en cohérence avec celles de la revue externe [2] : « *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.* »

En ce qui concerne le stockage des déchets bitumés MA-VL en l'état à Cigéo, suite à l'instruction du DOS et aux demandes de l'ASN, l'Andra étudie, dans le cadre du dossier de DAC, des options de conception renforcée, visant à apporter la démonstration de la sûreté du stockage en l'état des fûts de déchets bitumés sur la base d'hypothèses pénalisantes. Les dispositions identifiées à ce stade comprennent la mise en œuvre de moyens complémentaires de détection et de surveillance ainsi

qu'une capacité à intervenir rapidement et au niveau du colis si nécessaire (retrait de colis, dispositif d'extinction). Ceci se traduit par une évolution de l'agencement des colis de stockage dans les alvéoles et une augmentation du nombre d'alvéoles.

Le choix d'une conception de référence pourra être effectué ultérieurement au regard du résultat des études engagées sur la caractérisation des bitumes et des études plus détaillées restant à mener. La revue externe a apporté la conclusion suivante : « *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 amont de la définition de ces dispositifs, la revue externe a recommandé de compléter la connaissance de certains fûts, permettant d'améliorer la prédiction de leur réactivité et des seuils de température à respecter.

Le stockage en l'état des bitumes MA-VL à Cigéo ne prévoit, par définition, que la gestion des enrobés bitumés actuellement de catégorie MA-VL, les autres étant destinés à un stockage FA-VL, dont la conception devra tenir compte de la gestion du risque incendie en exploitation. Les incertitudes associées à l'aboutissement du projet sont couvertes par la prise en compte de ces enrobés bitumés dans l'inventaire de réserve de Cigéo.

Pour les options de traitement ou stockage en l'état, des étapes d'entreposage (plus ou moins longues) et de transport seront nécessaires, dans des conditions de sûreté maîtrisées. Les options se différencient par les durées d'entreposage et les quantités transportées, avec des impacts économiques qui restent modérés en regard des coûts de traitement et de stockage. Les analyses menées par le CEA et Orano montrent que la disponibilité d'emballages de type B pour le transport des fûts de déchets bitumés en l'état serait atteignable industriellement bien avant le délai visé, car aucun point réhibitoire n'a été identifié.

Comme le niveau de maturité des études relatives aux deux voies de gestion des fûts de déchets bitumés est très différent, il est difficile de les comparer de façon formelle et exhaustive. L'évaluation globale permet toutefois de dégager quelques tendances :

- La démonstration de sûreté, associée au stockage en l'état dans Cigéo, semble accessible.
- La démonstration de sûreté reste à mener pour la voie traitement, ce qui nécessite des études d'avant-projet et un niveau de R&D suffisant pour étayer une démonstration de sûreté.
- L'analyse économique préliminaire, tous segments confondus (entreposage, traitement éventuel, transport, stockage), en coûts bruts et avec les hypothèses considérées, est en faveur du stockage en l'état des fûts de déchets bitumés. En valeur brute, les surcoûts en dispositifs et nombre d'alvéoles dans le cas du stockage en l'état sont inférieurs aux coûts d'investissement et d'exploitation d'une installation de traitement.
- En coût actualisé, l'analyse économique est peu discriminante dans le choix des différents scénarios de gestion des fûts de déchets bitumés, compte tenu des incertitudes sur les évaluations et sur les différentes chroniques.

Si le traitement d'une fraction importante des enrobés bitumés était privilégié (correspondant par exemple à la totalité des fûts MA-VL présents dans l'inventaire de référence de Cigéo), alors le lancement d'un programme conséquent de R&D serait à prévoir, pour évaluer la faisabilité industrielle d'un procédé qui serait préférentiellement de type thermique. De premiers résultats de R&D seraient nécessaires pour établir un livre de procédé préliminaire, qui constituerait un préalable au lancement d'études d'ingénierie plus détaillées, dans l'objectif d'évaluer les points restés lacunaires à ce stade, tels que les rejets et l'impact environnemental, les principes de sûreté et maintenance, et *in fine* le coût.

Si le stockage en l'état dans Cigéo était privilégié, il n'est pas possible d'exclure à ce stade, que la démonstration de sûreté soit jugée insuffisante pour une partie résiduelle des fûts. La voie traitement pourrait alors s'appliquer à ce flux nettement réduit. Les procédés de traitement étudiés dans ce rapport (voie thermique) pourraient s'adapter à un faible flux mais sans gain économique majeur. En pratique cela pourrait conduire à revoir le choix du procédé de neutralisation, par exemple en réexaminant la pertinence d'un procédé chimique. C'est ce qui est recommandé par la revue externe.

En outre, le CEA étudie aujourd'hui, au vu des nouvelles caractérisations réalisées lors de la reprise des fûts de déchets bitumés, une évolution de la répartition des fûts de Marcoule, susceptible d'induire une augmentation de la fraction de fûts éligibles à la filière FA-VL et une modification de la répartition entre inventaire de référence et inventaire de réserve de Cigéo. Si un stockage en sub-surface devenait disponible, avec une conception permettant le stockage en l'état des enrobés bitumés, ceux restant de catégorie MA-VL pourraient alors être soit stockés en l'état, soit traités, selon un procédé également à adapter au flux résiduel.

Compte tenu de l'ensemble des incertitudes relatives à la fois à la stratégie de gestion des déchets bitumés, aux filières et aux procédés, le groupe quadripartite CEA, Andra, EDF et Orano qui a réalisé ce rapport recommande de poursuivre ou mener les actions nécessaires dans une vision pluriannuelle (sur les 3 à 5 ans à venir) afin d'apporter les éléments complémentaires qui permettront de progresser sur les modes de gestion des déchets bitumés :

- Dans le cadre de la voie traitement, le groupe propose la prise en compte de la recommandation de la revue externe relative au traitement, avec le lancement d'une pré-étude relative à la faisabilité scientifique d'une neutralisation des bitumes via une dissolution chimique dans le cas d'un faible flux de déchets à traiter.
- Les études relatives au stockage en l'état dans Cigéo sont poursuivies dans le cadre de la démonstration préliminaire de sûreté associée à la DAC de Cigéo. En parallèle, le groupe propose de compléter la caractérisation du comportement des enrobés bitumés de Marcoule et de La Hague conformément aux recommandations de la revue externe, notamment pour asseoir les démonstrations de sûreté en stockage.
- La conception qui sera finalement retenue pour la mise en œuvre ultérieure du stockage des déchets bitumés en l'état le cas échéant devra s'appuyer sur les résultats futurs de caractérisation du comportement des déchets bitumés (avec un éventuel ajustement de la démarche de sûreté du stockage).
- Enfin, les études relatives à un stockage en sub-surface sont à poursuivre, notamment dans un concept adapté à la prise en charge de déchets tels que les déchets bitumés. Le CEA prévoit de poursuivre, en lien avec l'Andra, les investigations visant à consolider les caractéristiques radiologiques des fûts de Marcoule et donc à consolider l'inventaire du projet de stockage FA-VL.

Le CEA, Orano, EDF et l'Andra ont lancé des réflexions communes pour instruire plus précisément les modalités de prise en compte des demandes de l'ASN et des recommandations de la revue externe (définition d'un programme d'études et calendrier associé).

## VIII. REFERENCES

- [1] Lettre CODEP-DRC-2018-001635 du 12 janvier 2018 – Dossier d’options de sûreté pour le projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde
- [2] « Revue externe sur la gestion des déchets bitumés – rapport final », juin 2019
- [3] Document technique CEA/DEN/DADN DO 55 « Rapport PNGMDR 2013-2015 : évaluation technico-économique d’un procédé de traitement d’enrobés de boues bitumée par incinération-vitrification », Février 2015
- [4] Rapport MOA/Cab. AG/18-119 « Etat d’avancement des travaux sur des scénarios prospectifs de traitement et conditionnement des déchets d’enrobés bitumineux », Juin 2018
- [5] Andra, Inventaire National 2018
- [6] DM2D NT 2018-077 « Rapport d'étape présentant l'état d'avancement à fin 2018 des travaux de développement du procédé d'incinération / vitrification (PIVIC) visant à conditionner les déchets MA-VL organiques riches en émetteurs alpha », décembre 2018
- [7] Document Andra CC-TE-D-NSY-AMOA-SR1-0000-1 8-0006/B, « Stockage en l'état des fûts de déchets bitumés dans Cigéo- Maîtrise des risques et principes d'évolution de conception », juillet 2019
- [8] Document Andra FRPADPG150010 « Projet de stockage de déchets radioactifs de faible activité massique à vie longue (FA-VL) - Rapport d'étape 2015 »
- [9] Document Andra FNTASPF180004 « Stockage des déchets FAVL : enjeux et exigences préliminaires de sûreté », mai 2019
- [10] « Rapport du CEA au titre de l’article 47 du décret portant les prescriptions du PNGMDR 2016-2018 », Juin 2018
- [11] Document Orano DM2D NT 2018-052, « Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016 – 2018, Colis de déchets radioactifs MAVL destinés au Cigéo – Etat d’avancement des études de transportabilité des fûts de bitume depuis le site de La Hague », Juin 2018