


		CEA/DEN/DADN DO 55 27/02/15  15MMBC000038 diffusé le : 27/02/15
	Document technique DEN	Page 1 / 33

DIRECTION DE L'ENERGIE NUCLEAIRE

**Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement
d'enrobés de boues bitumées par incinération/vitrification**

(Rapport PNGMDR 2013-2015)

**Direction de l'énergie nucléaire
Centre de Saclay
91191 Gif sur Yvette Cedex
www.cea.fr**

	<p align="center">Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées</p>	<p>CEA/DEN/DADN DO 55 27/02/15</p>  <p>15MVBCC000098 diffusé le: 27/02/15</p>
<p align="center">Document technique DEN</p>		<p align="right">Page 2/33</p>

MOTS CLEFS

Enrobés bitume, procédé de traitement thermique, vitrification, stockage

RESUME / CONCLUSIONS

Cette note évalue les coûts d'un procédé de traitement par combustion/vitrification d'environ 60000 colis d'enrobés de boues bitumées de catégorie FAVL et MAVL, entreposés sur le centre CEA de Marcoule. Cette évaluation technico-économique et de sûreté identifie :



1. Le coût amont d'une R&D exploratoire, qui se révélerait indispensable pour tenter de lever les verrous technologiques, avant de pouvoir atteindre une première esquisse de faisabilité technologique.
2. Le coût de conception, réalisation et exploitation de l'installation.
3. Le caractère défavorable d'un traitement, étant donné son faible niveau de maturité technologique, ainsi que les difficultés identifiées de la maîtrise des risques et des impacts environnementaux, comparativement à la solution industrielle historique de référence du stockage géologique des colis d'enrobés de boues bitumées.

En l'état actuel des connaissances scientifiques et techniques, il n'y a pas de faisabilité technologique démontrée, étant donné le nombre de verrous « procédés » et de verrous « technologiques » identifiés.

Les résultats de l'évaluation économique conduisent par ailleurs à identifier un surcoût très conséquent pour la gestion des colis d'enrobés bitume en cas de mise en œuvre d'un procédé de traitement avant la mise en stockage dans les exutoires finaux, car :



- Le coût global des actions de R&D amont puis de réalisation d'une installation, de son exploitation et de son démantèlement, est estimé à 1,72 Mds€_{CE2013} (50% d'incertitude).
- Le facteur de réduction de volume des déchets ultimes issus d'un traitement a été estimé à 2. Le coût spécifique de mise en stockage profond des résidus de traitement est estimé à 643M€_{CE2013}, conduisant à un chiffrage complet de 2,37Mds€_{CE2013}.

En regard de ces différents éléments, le CEA conclut à la non pertinence technico-économique et de sûreté du scénario prospectif de traitement des colis d'enrobés de boues bitumées, comparativement à la solution du stockage géologique qui fait l'objet de plus de 25 ans d'études et développement.



	<p align="center">Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées</p>	<p>CEADENDADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15</p>
<p align="center">Document technique DEN</p>		<p align="right">Page 3/33</p>

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION.....	5
1.1	Objet	5
1.2	Documents de référence	6
2	EVALUATION DES COÛTS.....	8
2.1	L'étape de recherche & développement	8
2.1.1	Rappel du contexte industriel des opérations de RCD sur le site du CEA-Marcoule	8
2.1.2	Etat de l'art sur l'incinération/vitrification d'enrobés bitume	10
2.1.3	Autres études exploratoires de traitement chimique d'enrobés de boues bitumées.....	15
2.1.4	Coûts estimés de l'étape de recherche et développement d'un procédé d'incinération/vitrification des enrobés de boues bitumées	15
2.2	Coûts de conception – Réalisation de l'installation	16
2.2.1	Hypothèses	16
2.2.2	Tableau récapitulatif.....	17
2.3	Coûts des équipements du bâtiment	18
2.3.1	Hypothèses	18
2.3.2	Analyse.....	18
2.3.3	Tableau récapitulatif.....	18
2.4	Coûts complet de construction de l'installation (R&D, Projet, conception, réalisation, génie civil...)	19
2.5	Coûts d'exploitation	19
2.5.1	Hypothèses	19
2.5.2	Coût du personnel d'exploitation (natures 10 et 81) -	20
2.5.3	Coût des utilités et des consommables (nature 30).....	21
2.5.4	Coût maintenance (nature 30)	21
2.5.5	Coût des taxes INB et IRSN (nature 30).....	21
2.5.6	Coûts divers (nature 30).....	21
2.5.7	Dotation pour le démantèlement.....	21
2.5.8	Tableau récapitulatif.....	21
2.6	Coûts additionnels.....	22
2.7	Coûts des différentes filières envisageables pour les enrobés bitumes à traiter.....	22
2.7.1	Coût de stockage des fûts d'enrobés bitume (pas de traitement)	22
2.7.2	Coût de stockage des déchets après traitement – hypothèse 100% MAVL.....	23
2.7.3	Coût de stockage des déchets après traitement – hypothèse mixte MAVL-FAVL	24

	<p align="center">Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées</p>	<p>CEADENDADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15</p>
<p align="center">Document technique DEN</p>		<p align="right">Page 4/33</p>

3	COMPARAISON DES SCENARIOS.....	24
3.1	Coût de l'Installation de traitement des déchets bitumes (Conception, réalisation, Exploitation, démantèlement)	24
3.2	Coût complet incluant le coût de stockage des déchets ultimes (Scénario 100% MAVL)	25
3.3	Coût complet incluant le coût de stockage des déchets ultimes (Scénario mixte FAVL + MAVL).....	25
3.4	Tableau comparatif global	26
4	Analyse des Meilleures Techniques Disponibles (MTD).....	26
5	CONCLUSION	33

	<p align="center">Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées</p>	<p>CEA/DEN/DADN DO 55 27/02/15</p>  <p>15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15</p>
<p align="center">Document technique DEN</p>		<p align="right">Page 5/33</p>

1 INTRODUCTION

1.1 Objet

L'objet de la présente note de synthèse est d'évaluer sous l'angle technico-économique et de sûreté un scénario prospectif de retraitement par combustion et vitrification de fûts d'enrobés de boues bitumées fabriqués au CEA Marcoule depuis le milieu des années 60, et entreposés depuis cette date sur le site. Cette étude relève d'une demande prospective du Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs 2013-2015 (article 19.II.3 du décret du 27 décembre 2013 décrivant les prescriptions de PNGMDR) ; cette étude est prospective dans la mesure où la référence industrielle en vigueur est le reconditionnement dans des surfûts en inox des fûts primaires d'enrobés de boues bitumées, puis leur orientation à terme vers les deux filières de gestion en stockage à l'étude par l'ANDRA, l'une en stockage géologique profond (CIGEO) et l'autre en stockage de sub-surface (FAVL).



61732 fûts d'enrobés de boues bitumées (FEB) issus du traitement historique des effluents radioactifs de l'usine UP1, et des opérations d'assainissement en cours, constituent l'inventaire sur le site de Marcoule :

- les 28831 fûts de boues bitumées les plus chargés (catégorie MAVL) sont inscrits dans l'inventaire PIGD de Cigéo (intégrant la production restant à venir à la STEL de Marcoule),
- les 32901 fûts les moins chargés (catégorie FAVL) relèvent d'un stockage dans un futur site FAVL en sub-surface, suite à leur refus au CSA en 2006.

Ces fûts d'enrobés de boues bitumées sont répertoriés dans l'inventaire national des déchets radioactifs publié par l'Andra, ainsi que leur orientation vers les futurs sites de stockage à l'étude.

La référence industrielle en vigueur du CEA pour la gestion des fûts d'enrobés de boues bitumées, associée à des engagements de sûreté pris vis-à-vis de l'ASND, est inscrite dans le cadre de l'article 20 de la loi du 28 juin 2006. Elle est la suivante :

- désentreposage avant fin 2035 de tous les fûts de bitumes actuellement positionnés en casemates de la zone sud de la STEL de Marcoule, contrôles et mise en surfût de type EIP en acier inoxydable,
- pour les fûts de bitumes de catégorie FAVL, dont une grande partie a déjà été reprise à partir du début des années 2000 depuis les fosses de la zone nord de Marcoule pour reconditionnement en surfût inox et entreposage en alvéoles EIP, une expédition démarre à partir de 2025 vers le site de stockage FAVL en sub-surface,
- pour les fûts bitumes de catégorie MAVL, une expédition démarre à partir de 2030 vers le site de stockage CIGEO,
- les chroniques d'expédition des fûts de bitume vers les 2 filières de stockage, aux dates annoncées, conditionnent les besoins en installations d'entreposage d'attente sur le site de Marcoule. Des retards sur ces dates de références impliqueraient des modifications notables du scénario industriel de référence, sous les angles techniques et financiers. Typiquement, l'impossibilité de stocker les bitumes FAVL dans un stockage de sub-surface à l'horizon de 2025 se traduirait par un scénario de repli industriel consistant à entreposer l'ensemble des fûts de bitume (FAVL et MAVL) dans les alvéoles EIP

	Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées	CEADENDADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15
Document technique DEN		Page 6/33

supplémentaires, suivi d'une expédition vers le stockage géologique profond CIGEO au-delà de l'horizon 2050.

Un élément de contexte important est que le stockage des bitumes à CIGEO a fait l'objet d'interrogations de la part des évaluateurs suivants : CNE₂ (rapport n°6 de fin 2012) IRSN (rapport 2013-00001) et ASN (avis 2013-AV-0179). Le risque perçu des colis de bitume en conditions de stockage serait celui associé à un scénario incidentel d'incendie, d'origine extérieure aux colis de boues bitumées, susceptible de les agresser potentiellement de façon à induire leur auto-échauffement puis au-delà d'une certaine température, leur auto-inflammation. Une démarche scientifique de démonstration expérimentale a été engagée sur la période 2012-2014, via un programme de R&D de démonstration de la maîtrise des risques incendie, défini conjointement par le CEA, l'Andra, AREVA et EDF, conformément à la demande de la CNE₂ exprimée dans son rapport n°6 de fin 2012. Les résultats de tenue à l'agression au feu sur colis échelle 1 inactifs en conditions représentatives ont été obtenus fin 2014, et présentés en audition CNE₂ le 22 janvier 2015. Les résultats acquis montrent que, pour le scénario incidentel d'un incendie en alvéole de stockage, les colis primaires de boues bitumées, placés dans un colis de stockage en béton, ne sont pas endommagés : il n'y a pas d'auto-échauffement, ni d'auto-inflammation.

L'intégralité des coûts mentionnés dans cette note d'étude prospective est exprimée en Euros (€) aux conditions économiques 2013. Compte tenu du stade, il faut noter qu'une provision pour risques et aléas de 50% du montant total estimé a été intégrée au chiffre global. Les coûts présentés dans cette note sont exprimés en valeur brute. L'analyse menée englobe :



- la valorisation des coûts pour les équipements du commerce et/ou « la nucléarisation » à partir de prix « catalogue » ou de retour d'expérience,
- la valorisation, à partir de ratios (base de coûts internes du CEA) du Département des Projets d'Installations et Emballages de la DEN à Cadarache (CEA/DEN/CAD/DPIE), des coûts de construction et d'investissement (génie civil de l'installation, utilités (ventilation, ECC, RP, TSV...), VRD...), ainsi qu'une dotation pour démantèlement,
- la valorisation des coûts d'exploitation de l'installation à partir de ratios existants (taux horaires, coûts d'exploitation...), et relevant d'une base de coûts de propriété CEA.
- l'évaluation, selon 2 scénarios, du gain potentiel en termes de volume des déchets à stocker après traitement (hors déchets provenant du démantèlement de l'installation).

1.2 Documents de référence

[1] – Norme ISO 17873 Installations nucléaires — Critères pour la conception et l'exploitation des systèmes de ventilation des installations nucléaires autres que les réacteurs nucléaires.

[2] - Rapport du Haut-Commissaire à l'Energie Atomique - Le stockage souterrain des colis de déchets bitumés (Janvier 2014). Y. Brechet

[3] The vitrification as pathway for long life Organic waste treatment. WM'06 Conf., Tucson, AZ, 2006. C. Girold, F. Lemort, O. Pinet.

	<p><i>Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées</i></p>	<p>CEA/DEN/DADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15</p>
	<p>Document technique DEN</p>	<p>Page 7/33</p>



[4] Maltene and Soluble Salt Removal from Bituminized Waste Simulates: Fractionation of the Waste Elements. N.R. E. N. Impens, Jo M. P. Van Laer, L. Vos, A. J. G. Leenaers, A.F. Fonteyne, P. M. F. Thomas, P. J. P. Van Bree, S. Dekelver, and R. C. P. Vandevorde. Energy & Fuels 2005, 19, 1235-1244.

[5] Rapport CNE2 n°6, 2012

[6] Avis ASN-Avis n° 2013-AV-0179 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 16 mai 2013 sur les documents produits par l'Andra depuis 2009 relatifs au projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde

[7] Rapport IRSN n°2013-00001 Tome 1 Programme Industriel de Gestion des Déchets (p31/62). Projet Cigéo – Examen des études remises depuis 2009.

[8] Inventaire National des matières et déchets radioactifs 2012, www.andra.fr

	<p align="center">Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées</p>	<p>CEA/DEN/DADN DO 55 27/02/15</p>  <p>15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15</p>
<p align="center">Document technique DEN</p>		<p align="right">Page 8/33</p>

2 EVALUATION DES COUTS

2.1 L'étape de recherche & développement

2.1.1 Rappel du contexte industriel des opérations de RCD sur le site du CEA-Marcoule

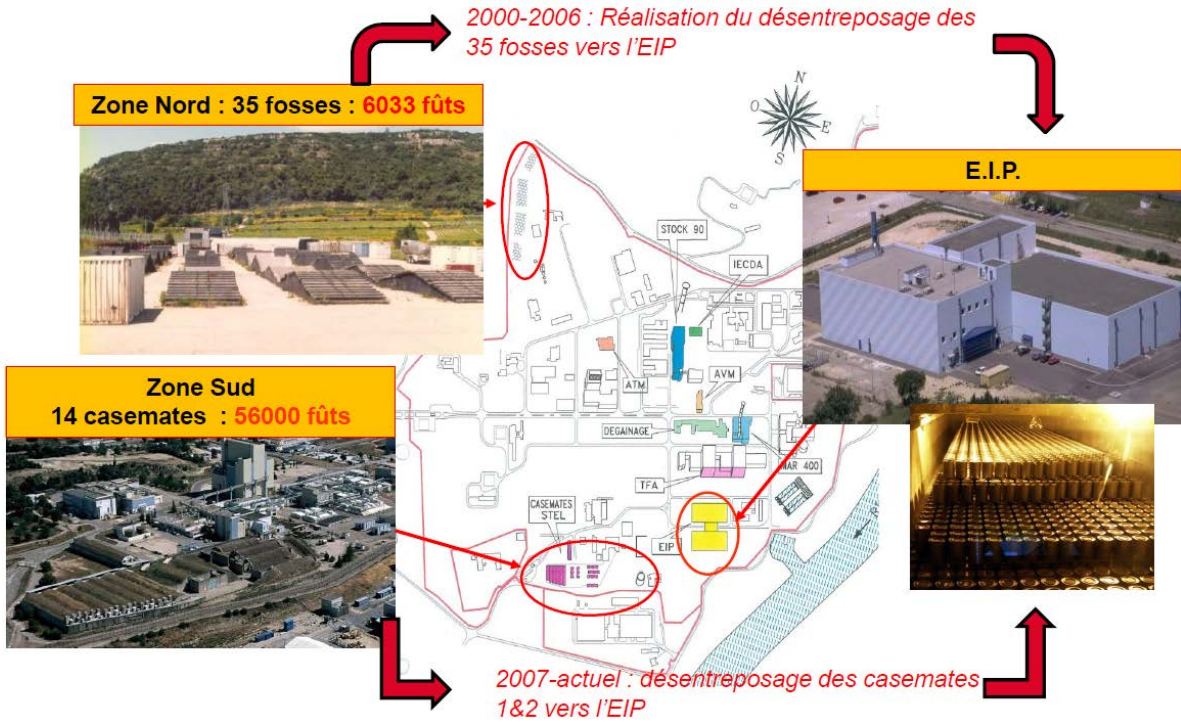
Entre 2003 et 2005, le CEA a réalisé des études exploratoires sur les potentialités d'un traitement thermique des enrobés bitumes par incinération puis vitrification [3]. Ce sont ces résultats qui sont repris dans ce document.

L'objectif de l'étude était de statuer sur l'opportunité d'un choix de la filière de référence industrielle à retenir par le GIE-CODEM associant le CEA, AREVA et EDF, pour la conduite des opérations de RCD (Reprise et Conditionnement des Déchets historiques) sur les fûts d'enrobés de boues bitumées entreposés dans des installations anciennes atteignant progressivement leur durée de vie maximale à Marcoule :

- soit la mise en place d'une filière de retraitement des colis historiques de boues bitumées par un procédé d'incinération/vitrification, en vue de faire des colis de déchets vitrifiés, à un horizon compatible avec les contraintes des opérations de RCD,
- soit une gestion des fûts de boues bitumées par re-colisage dans des enveloppes métalliques en acier inoxydable, puis entreposage d'attente dans de nouvelles installations de surface sur le site de Marcoule, en vue de leur mise en stockage dès l'ouverture des sites Andra envisagés à l'horizon 2025. C'est in fine cette option qui a été prise en référence industrielle.



Le GIE-CODEM avait in fine conclu à la pertinence du déploiement du scénario industriel de re-colisage des fûts d'enrobés bitume en surfût inox dit « EIP », associé à des opérations de contrôle et caractérisations physico-chimiques des fûts de bitume, car il apportait tous les éléments de faisabilité dans un calendrier compatible avec les objectifs de sûreté assignés à l'exploitant nucléaire.

De lourdes opérations industrielles de RCD, en accord avec les arbitrages industriels réalisés, sont depuis cette date conduites sur le centre du CEA Marcoule. Elles sont résumées sur les figures suivantes.



Ce schéma précise les zones géographiques d'entreposage des fûts d'enrobés de boues bitumées, historiques (fosses de la zone nord et casemates de la zone sud) et récentes (alvéoles EIP-Entreposage Intermédiaire Polyvalent). Les figures suivantes illustrent le déroulement des opérations de reprise et conditionnement des fûts et démontrent la faisabilité technique de cette opération, avec une gestion maîtrisée des risques d'exploitation.



	<p>Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées</p>	<p>CEA/DEN/DADN DO 55 27/02/15 15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15</p> 
<p>Document technique DEN</p>		<p>Page 10/33</p>

2.1.2 Etat de l'art sur l'incinération/vitrification d'enrobés bitume

L'étude R&D du CEA des années 2000 s'est plus particulièrement focalisée sur l'évaluation de la capacité d'incinérer par torche à plasma des échantillons d'enrobés bitumes simulant inactifs. L'étude visait également à appréhender la faisabilité scientifique de vitrifier les composés minéraux des sels présents dans l'enrobé bitume, après destruction thermique de ce dernier.

Des essais ont été conduits sur une plateforme de développement d'un four de fusion chauffé par induction (creuset froid), équipé d'un système de torches jumelées à plasma d'oxygène (maquette SHIVA, Figure 1 ci-dessous). Les torches visent à oxyder la matière organique à haute température. Un dispositif simplifié de traitement des gaz est couplé au four. Il est constitué d'une conduite d'évacuation des gaz à double paroi refroidie, puis d'un étage de préfiltration de fumées. La filtration est complétée par un système à manches classiques, équipé d'un dispositif de décolmatage pneumatique. Les gaz ainsi filtrés sont ensuite entraînés vers un système de lavage à l'eau sodée. Il n'y a pas de dispositif de post-combustion des gaz sur la maquette d'incinération/vitrification, ni de système de filtration de Très Haute Efficacité (THE).

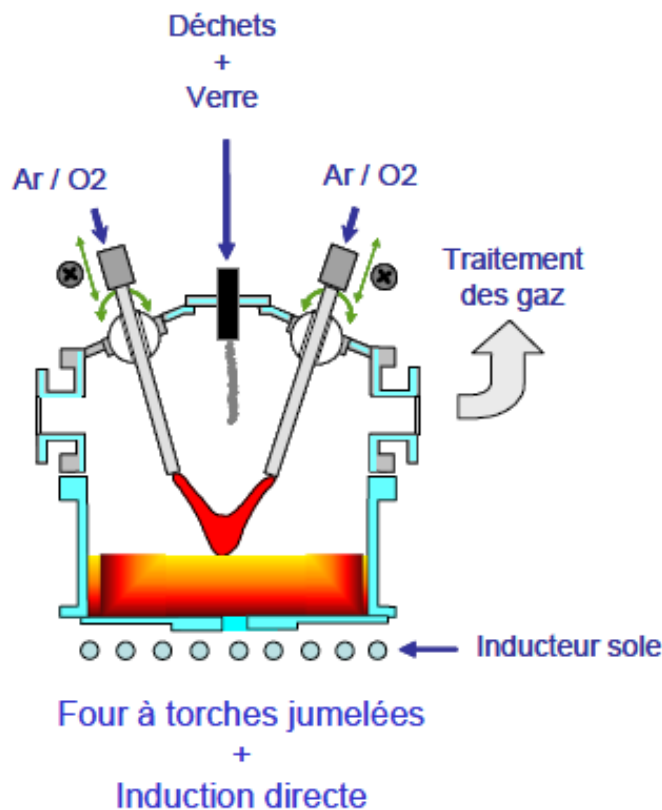




Figure 1. Maquette SHIVA (Système Hybride d'Incinération Vitrification Avancé)



	Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées	CEADEN/DADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15
	Document technique DEN	Page 11/33

Le programme d'essais conduit par le CEA était le suivant :

- 4 essais technologiques ont été réalisés avec le prototype Shiva, mettant en jeu à chaque fois une quantité maximale de 20kg d'enrobé bitume reconstitué simulant inactif, sur une durée maximale de 8 heures environ,
- dans chaque essai, le four contenait un volume de 50 kg de fritte de verre portée entre 1200 °C et 1400 °C, avant le début de l'alimentation progressive de l'enrobé bitume entre les 2 torches à oxygène,
- le premier essai visait à tester l'efficacité de la combustion de la matrice bitume ne contenant que le sel BaSO₄ et la diatomée, principaux composés minéraux des enrobés de boues bitumées. Le second essai visait à tester l'efficacité de l'incorporation du BaSO₄ dans la fritte de verre en fusion. Le troisième essai visait à tester le comportement d'un enrobé contenant l'ensemble des sels principaux d'une famille importante d'enrobés bitume produits à la STEL de Marcoule. Le quatrième essai visait à tester d'une part le comportement d'une seconde famille de composition chimique représentative de la production de la STEL de Marcoule et d'autre part à évaluer les quantités de poussières entraînées vers le dispositif de traitement des gaz.

Les compositions des enrobés testées sont reportées dans le tableau suivant.

	Déchets de référence principal	Déchets de référence secondaire
Sels		
Ca ₃ (PO ₄) ₂	0,00	9,00
BaSO ₄	13,90	0,00
Fe(OH) _{x=3}	8,16	6,30
PPFNi Ni ₂ Fe(CN) ₆	4,54	4,00
Charbon	1,85	2,00
Cu(OH) ₂	1,85	1,00
Ni(OH) ₂	0,00	1,20
Ti(OH) ₄	0,00	0,00
MnO ₂	0,37	0,30
Pb(IO ₄)	0,00	0,00
UO ₂ (OH) ₂	0,00	0,00
Na ₂ SO ₄	0,47	1,00
NaNO ₃	1,86	0,20
total sels	33,00	25,00
chaux Ca(OH)₂	0,00	6,00
diatomées	4,00	4,00
TBP	0,00	3,00
tensio-actif	2,00	2,00
eau	1,00	0,00
bitume	60,00	60,00
total	100,00	100,00
masse du fût Fe	15,00	17,00
masse d'enrobé bitume par fût (kg)	267	267

	Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées	CEADENDADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15
Document technique DEN		Page 12/33

Les 4 essais ont mis en évidence des points durs sur la technologie de traitement, ainsi que sur le matériau de confinement ultime. Ils sont listés ci-dessous :

- L'alimentation de l'enrobé dans le cœur de procédé au niveau des torches plasma a été réalisée par chauffage préalable vers 50-60°C de l'enrobé, en dehors du four, pour permettre un entrainement gravitaire dans le four. L'assistance d'un dispositif mécanique (à vis sans fin) s'est révélée nécessaire. Ce système ne s'est pas révélé performant du fait de séquences de colmatage, et de variations induites du débit d'alimentation entre les torches plasma. Il a été conclu à la nécessité d'un broyage préalable mécanique de l'enrobé à une taille inférieure au centimètre. Cela ne peut s'envisager qu'avec une étape de cryotraitement préalable (congélation des fûts à -60°C), puis concassage. La faisabilité scientifique et technologique d'un procédé de cryotraitement puis broyage à l'échelle centimétrique d'enrobés de boues bitumées, en environnement nucléaire téléopéré n'a pas été étudiée, ni testée, ni démontrée.
- La maîtrise du rendement de combustion du bitume au cours des essais technologiques n'a pas été complète. Elle n'est pas démontrée, notamment selon la régularité de l'alimentation en enrobé au niveau des torches plasma. La complétude de la destruction du bitume n'a pas été atteinte. Des résidus (plusieurs pourcents) organiques se sont déposés sur les pièces internes du dispositif SHIVA.
- Le traitement des gaz nécessite un dimensionnement conséquent en regard des poussières et éléments volatilisés tels que les SO_x, NO_x, CO/CO_x issus de la décomposition des sels et du bitume, ainsi que ceux issus de la réduction des éléments métalliques volatiles à très haute température. Le dispositif actuel n'a pas permis d'évaluer la faisabilité d'un recyclage continu des poussières, en régime stationnaire. Un dispositif nouveau, différent du pré-filtre testé, serait à concevoir. Par ailleurs, l'acceptabilité environnementale des rejets de ce type de gaz n'a pas été considérée.
- Le bilan des matières et des radioéléments dans le procédé n'a pas été étudié. Il constitue cependant un élément clé en vue d'obtenir une faisabilité technologique. La présence des radionucléides a été simulée dans les essais par l'emploi d'isotopes stables (Cs, Sr) ou des analogues chimiques (terres rares pour les actinides). Il n'y a pas eu de bilan matière réalisé (sur Cs, Sr, actinides, ...), des régimes stationnaires de fonctionnement de l'installation n'ayant pas été atteints.
- Les schémas de décomposition des sels de co-précipitation, enrobés dans les bitumes (sulfates, nitrates, ...), sont complexes au niveau des torches plasma d'une part, ainsi qu'à la surface et dans le bain de verre d'autre part. Le sel prépondérant de l'enrobé est BaSO₄ : il a été identifié comme un composé particulièrement dimensionnant à décomposer en température (Figure 2).

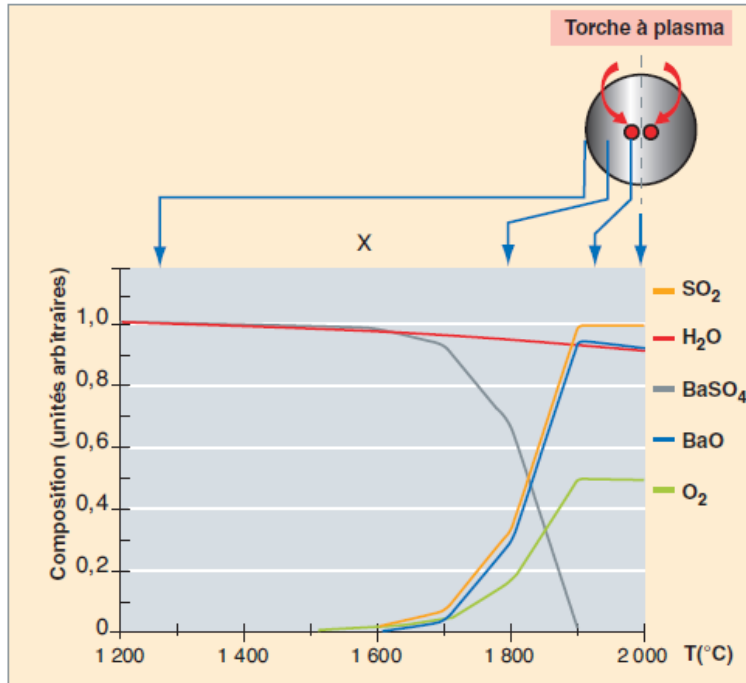




Figure 2. Exemple d'un calcul théorique sur le taux de décomposition du sel $BaSO_4$ à différentes températures, et positionnement des points de températures autour des torches plasma dans le four.

- L'objectif à atteindre est en effet de faire entrer l'oxyde prépondérant BaO (ainsi que les oxydes des autres sels), ainsi que tous les radionucléides sorbés sur les sels, dans le verre fondu, afin obtenir in fine une matrice homogène à l'échelle atomique, caractérisée par une insertion des radionucléides dans le réseau vitreux silicaté. Les sulfates SO_4^{2-} décomposés en température à partir du sel $BaSO_4$ sont alors à évacuer sous forme gazeuse, vers le dispositif de traitement des gaz du procédé, à des fins de piégeage et précipitation pour former un déchet TFA. Le sulfate de baryum se décompose spontanément à environ $2000^\circ C$ en SO_2 et BaO . Si ce sulfate est mis en présence de silice (le verre fondu), la température de décomposition est abaissée vers $1300^\circ C$. Dans un traitement visant à l'incorporation de la charge minérale BaO dans un bain de verre, la silice, qui permet la formation de silicate de baryum, est apportée par le verre en fusion. La possibilité d'amener une quantité de chaleur suffisante sur un bain de verre peut être assurée par la mise en place de torches à plasma au-dessus de la surface. Le contact optimal entre le plasma, l'enrobé et la fonte verrière est indispensable pour assurer conjointement l'apport thermique en vue de la dissociation du sel, et les conditions chimiques favorables à cette dissociation. La maîtrise technologique d'un tel contact n'est pas obtenue à ce stade. Pourtant, les données thermodynamiques et les essais préliminaires au laboratoire ont montré la nécessité de disposer d'une bonne décomposition du sulfate de baryum pour éviter des phénomènes d'oxydo-réduction particulièrement critiques à maîtriser dans un procédé d'incinération/vitrification. D'une part, en milieu trop oxydant, un lac de sels de sulfate fondu se forme en surface du bain de verre par un processus de séparation de phase liquide/liquide, dû à la faible solubilité des sulfates dans le verre silicaté. Ce lac de sulfates fondus va concentrer préférentiellement les éléments alcalins et alcalinoterreux (Na, Li, Cs, Sr), issu d'un échange de cations avec la fonte verrière. Ceci peut conduire après coulée de la fonte

	<p>Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées</p>	<p>CEADEN/DADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15</p>
<p>Document technique DEN</p>		<p>Page 14/33</p>



verrière, et solidification, à une matrice de confinement hétérogène de durabilité chimique réduite.

- D'autre part, des conditions trop réductrices, favorisées par la combustion du bitume, conduisent à la précipitation de billes de sulfures métalliques dans le bain de verre, pouvant rendre délicat la coulée du verre hors du four, et impacter la qualité du verre final (hétérogénéités). La coulée, avec un système comportant des phases aux propriétés physicochimiques très différentes constitue un verrou technologique. Seul un domaine intermédiaire restreint d'oxydo-réduction pourrait conduire à l'obtention de verres homogènes. Les résultats expérimentaux obtenus avec une technique d'incinération/vitrification démontrent la nécessité d'assurer un dosage précis du carbone (apporté par le bitume), en particulier en fonction de la teneur en soufre apporté par le sel du déchet enrobé. Cette voie de traitement apparaît donc très difficile en termes de pilotage industriel d'une installation, renforcée par le fait que les enrobés de boues bitumées présentent une plage de variabilité des teneurs en sels (rapport extrait secs et bitume).

Sur la base des essais réalisés sur un pilote d'incinération/vitrification de laboratoire (à l'échelle de plusieurs kilogrammes/heure), la faisabilité d'incorporer les oxydes résiduels des sels de sulfate et nitrates initiaux (après décomposition) dans une matrice vitreuse semble atteignable avec un facteur de réduction de volume de 2 environ. Par contre, la matrice vitreuse obtenue contenait des agrégats de sulfures métalliques dispersés, en conséquence des phénomènes d'oxydo-réduction à haute température tels que précédemment évoqués, dont l'impact sur la maîtrise du fonctionnement du four de fusion et la qualité finale comportementale de la matrice n'ont pas été quantifiés.

- Un autre aspect particulièrement dimensionnant est celui relatif à la gestion des matières fissiles. Chaque fût d'enrobé bitume peut contenir en moyenne 370g d'U (de 0.7 à 1.65% de ²³⁵U) et 1.2g de Pu, avec des valeurs extrêmes inférieures ou égales à respectivement 7000g/fût d'U et 16g/fût de Pu. Il serait par conséquent impératif d'évaluer la capacité à maîtriser en ligne le bilan des matières au cours du fonctionnement d'un procédé. Pratiquement, l'option d'un procédé d'incinération/vitrification en continu impliquerait des arrêts périodiques de nettoyage du cœur de procédé (chasse matière), impactant de fait les cadences industrielles. Par hypothèse, le raisonnement suivant est tenu. Sur la base d'un procédé traitant 150kg/h, la chambre de combustion voit passer une masse cumulée de 250g de Pu après traitement de 210 fûts de bitume, caractérisés par une quantité moyenne de 1.2g de Pu par fût. Cette masse de 250g est atteinte après traitement de 16 fûts chargés à la valeur maximale de 16g/fût de Pu. La chambre de combustion verrait ainsi passer une masse de 250g de Pu tous les 17 jours (respectivement tous les 2 jours pour la teneur max en Pu des fûts). Ceci impliquerait l'arrêt de l'installation pour établir un bilan matière et une chasse matière. L'impact sur le taux de disponibilité opérationnelle de l'installation est ainsi très significatif, pour cause de contrôle matière (accumulation, encrassement). A ce stade, il est pris pour hypothèse un arrêt de l'installation pour établir un bilan matière à hauteur de 15% du temps de fonctionnement en production de l'installation.

En résumé, il est estimé qu'une durée globale de R&D technologique et matériau de 10 ans serait indispensable pour lever les verrous identifiés, afin d'aboutir au démarrage d'une l'installation pilote en actif d'incinération/vitrification. A cela il faudrait ajouter l'étape de R&D de mise au point du procédé et de spécification du colis de déchet final produit.

	Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées	CEADENDADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15
Document technique DEN		Page 15/33

2.1.3 Autres études exploratoires de traitement chimique d'enrobés de boues bitumées

- Une étude ponctuelle exploratoire de laboratoire a été conduite au SCK-CEN (Belgique) durant la période 2005-2011 [4], sur les potentialités d'un traitement chimique à température ambiante par solvant organique d'enrobés de boues bitumées. L'étude a été conduite sur des microéchantillons de quelques grammes d'enrobés bitumes simulant inactifs, contenant uniquement un sel soluble (NaNO_3) à hauteur de 33% en masse d'enrobé. L'objectif était d'aboutir à une démonstration préliminaire à l'échelle du laboratoire du principe de faisabilité du traitement par dissolution du bitume, puis extraction des sels. Cette étude n'a pas abordé les questions de génie du procédé, et de sa mise en œuvre à l'échelle technologique. Les points importants tirés de l'étude sont les suivants :
 - Pour dissoudre 1g de bitume (fraction maltène uniquement), entre 8 et 24g de solvant organique sont nécessaires.
 - Il est supposé que ce solvant est incinérable avec un procédé en œuvre en Belgique (qui n'est ni décrit ni testé dans les documents traitant de l'étude du CEN/SCK).
 - La fraction de sel soluble (nitrate de sodium) séparée par un processus de filtration (non décrit) est annoncée comme pouvant être détruite (dénitration) selon plusieurs procédés (non décrits).
 - Le procédé de dénitration n'est pas décrit, mais est annoncé comme devant faire l'objet de recherche.
 - Pour 1g de bitume, l'effluent généré salin contiendrait 24g d'eau contaminée. Le résidu final (30% de la masse initial de l'enrobé bitumé), contient les sels insolubles et la fraction d'alsphatène non solubilisée par le solvant.
 - Ce résidu est mis en forme par compactage (pressage à froid, à environ 1 tonne / cm^2) sous la forme de pastilles de taille centimétrique. Aucune extrapolation à l'échelle technologique de la faisabilité d'un traitement/conditionnement de ce type de pastille de composite n'a été abordée dans cette étape, ni aucune étude de comportement à long terme du matériau obtenu.



Sur la base de ces éléments très préliminaires publiés par le SCK/CEN, il n'apparaît aucune évaluation de la capacité à gérer à l'échelle technologique un traitement de minéralisation d'un volume conséquent des effluents organiques générés par attaque chimique d'enrobés de boues bitumées

2.1.4 Coûts estimés de l'étape de recherche et développement d'un procédé d'incinération/vitrification des enrobés de boues bitumées

Des coûts de R&D ont été calculés pour la conception et la réalisation d'un pilote inactif d'incinération/vitrification, en préalable à la conception d'une installation industrielle de traitement. Il est fait l'hypothèse d'une durée de 10 ans de R&D pour aboutir à la réalisation d'un pilote en inactif et à l'aboutissement de tests de qualification d'un procédé.

Les coûts de conception/réalisation sont répartis sur les deux premières années pour un total de 15 285 K€.

L'exploitation du pilote durera ensuite 8 années pour un total de 5 394 K€ répartis de la manière suivante :

	<p align="center">Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées</p>	CEADENDADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15
	Document technique DEN	Page 16/33

- 2 cadres soit 191,7 K€/an
- 8 non cadres 482,5 K€/an

Les tests d'endurance, fiabilisation, tests fonctionnels et modes nominaux dégradés représentent 53 803 K€.

	Coûts de la R&D en K€ 2013	
		Total R&D
Coût de la R&D	Construction du pilote inactif	15 285
	Tests d'endurance	13 451
	Fiabilisation	13 451
	Tests fonctionnels	13 451
	Modes nominaux dégradés	13 451
	Exploitation	5 394
	Total	74 482

2.2 Coûts de conception – Réalisation de l'installation

Les coûts de conception-réalisation de l'installation de traitement des fûts de bitume ont été établis notamment à l'aide de ratios du Département des Projets d'Installations et Emballages du CEA de la DEN (CEA/DEN/CAD/DPIE). Ils sont basés sur la construction d'un bâtiment de 36000 m³, dont 2000 m³ nucléaire.



Ils comprennent :

- Les coûts de fourniture et travaux :
 - process et équipements,
 - génie civil ; VRD ; terrassements,
 - fluides, électricité, ventilation, radioprotection,...
 - incertitudes techniques liées aux informulés,
- Les coûts de pilotage de projet :
 - MOA
 - MOE
- Les autres postes :
 - obligations réglementaires (contrôle technique, CSPS, assurances, dépenses 'enquêtes publiques',...)
 - provisions pour risques et aléas.

2.2.1 Hypothèses

L'évaluation de chiffrage est basée notamment sur les hypothèses suivantes :

- Génie civil
- réalisation d'un bâtiment nucléaire de surface non enterré,
- taux de ferrailage du béton armé (BA) à une moyenne de 220 kg du m³,
- épaisseurs des voiles BA de 40 cm pour un voile de structure,

	Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées	CEADEN/DADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15
	Document technique DEN	Page 17/33

- épaisseur de dalle BA de 40 cm,
- épaisseur de radier de 80 cm avec couche de béton drainant,
- épaisseur de voile pour protection biologique (BA) de 80 cm,

- Zone Procédé
- un sas camion (1 et 2) en ventilation IIA avec un taux de renouvellement de 2 volumes. Heure,
- une zone « cellule blindée » IIB ou IIIB avec un renouvellement minimal de 4 volumes. Heure,
- une zone « four de vitrification » classe IV avec un renouvellement minimal de 7 volumes. Heure,



- Annexes techniques
- une ventilation générale bâtiment (soufflage et extraction ambiance),
- une ventilation extraction procédé pour la zone « cellule blindée »,
- une ventilation extraction pour le procédé de vitrification,
- un soufflage en toiture,
- un groupe froid et frigorigène en toiture.

Malgré l'importante longueur du bâtiment, le risque de chute d'avion n'a pas été pris en compte dans le design du génie civil. Deux lignes de production sont prévues pour fonctionner 24h/24 sur une ligne, l'autre venant en secours. Les coûts de réalisation de ces deux lignes sont intégrés au chiffrage. Le volume des acrotères des toits n'a pas été comptabilisé.

2.2.2 Tableau récapitulatif

Le tableau ci-après récapitule les coûts de conception-réalisation du bâtiment, incluant les investissements des équipements procédés.

Synthèse Conception - réalisation du bâtiment						
		Nombre	Coût unitaire en k€ 2013	Coût Total en k€ 2013	Source 2012	Remarque
GC, Courants forts, Utilités	Génie Civil	2	14 375	33 000	DPIE	mail TA réévaluation DPIE 09/2014
	Installation chantier	1	1 400	1 400	DPIE	mail TA réévaluation DPIE 09/2014
	Terrassement/VRD	1	2 900	2 900	DPIE	mail TA réévaluation DPIE 09/2014
	Ventilation	2	3 118	6 200	DPIE	mail TA réévaluation DPIE 09/2014
	Réseaux fluides	2	3 154	6 308	Inflation	
	Electricité et CC	2	4 781	9 562	DPIE	
	Radioprotection et téléalarme	2	2 286	4 573	Inflation	
Coûts d'équipements	Equipements Bâtiment de réception	1	276	276		
	Equipements Bâtiment de prétraitement	1	12 391	12 391		
	Equipements Bâtiment de traitement	1	26 946	26 946		
	Sous Total			103 556		mail TA réévaluation DPIE 09/2014
	Informulés/Incertitudes techniques	1	31 067	31 067	DADN	30 % de l'investissement M&T
	Total M&T		134 622	134 622		mail TA réévaluation DPIE 09/2014
Projet	MOA	1	21 540	21 540	DPIE	16 % de l'investissement (mail TA réévaluation DPIE 09/2014)
	MOE	1	35 002	35 002	DPIE	26 % de l'investissement (mail TA réévaluation DPIE 09/2014)
	Obligations réglementaires	1	8 077	8 077	DADN	6 % de la M&T (mail TA réévaluation DPIE 09/2014)
	Provisions pour risques et aléas		99 621	99 621	DPIE	50% de l'assiette total (mail TA réévaluation DPIE 09/2014)
Total			298 862	298 862		

	Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées	CEADEN/DADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15
Document technique DEN		Page 18/33

2.3 Coûts des équipements du bâtiment

Le terme équipement désigne :

- les moyens de levage et de manutention présents dans l'installation,
- les équipements spécifiques au procédé,
- les chambres froides,
- et tout autre équipement nécessaire à la bonne exécution du procédé.

Le coût de nucléarisation du procédé est directement intégré dans le coût des équipements.

2.3.1 Hypothèses

Certains postes ont fait l'objet d'une évaluation à partir de prix « catalogue », prix auxquels ont été appliqués un coefficient de « nucléarisation » estimé à 10 (coût équipement industrie nucléaire = 10 x coût équipement industrie classique). Il s'agit notamment du coût des chambres froides.

Le coût des équipements de levage et de manutention a, à la fois été estimé à partir du retour d'expérience du CEA/DPIE et de prix du commerce (portique, palan, chariot élévateur, table élévatrice...).

Le coût des équipements spécifiques a été évalué à partir du retour d'expérience CEA.

Les équipements (hors ceux du bâtiment de réception) ont été doublés dans le cadre d'une utilisation 24h/24.

2.3.2 Analyse

L'analyse du poste « équipements » est difficile à réaliser, sans considérer dans son intégralité le projet et son procédé de façon analytique.



En première approximation, les prix des équipements issus du commerce et les mises à jour de prix issues du retour d'expérience du CEA ont été pris en compte.

Toutefois, le cœur du procédé en lui-même et ses équipements (concasseur, presse, outil de découpe des fûts, four de vitrification...) reste sujet à très forte incertitude technique, car il s'agit de moyens à développer pour un projet nucléaire. L'estimation de coût reste donc sujette à forte incertitude.

2.3.3 Tableau récapitulatif

Le tableau ci-après présente les coûts en fonction de la localisation de l'équipement.

Le tableau suivant présente les coûts des équipements associés à chaque bâtiment.

	Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées	CEADENDADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15
	Document technique DEN	Page 19/33

Synthèse des coûts d'équipements	
	Coût en K€ 2013
Equipements Bâtiment de réception	276
Equipements Bâtiment de prétraitement	12 391
Equipements Bâtiment de traitement	26 946
Total	39 613

2.4 Coûts complet de construction de l'installation (R&D, *Projet, conception, réalisation, génie civil...*)

Le tableau ci-après présente la synthèse globale du coût de réalisation de l'installation incluant : la R&D, le projet (MOA, MOE...), la conception, la réalisation, le génie civil. Le total du coût de construction de l'installation est estimé à 413 M€.

Synthèse coût complet de conception/réalisation de l'installation		
		Coût en K€ 2013
Procédé	Bâtiment de réception	276
	Bâtiment de prétraitement	12 391
	Bâtiment de traitement	26 946
Infrastructure et équipements		134 622
Projet (MOA, MOE, obligations réglementaires)		64 619
R&D (<i>incluant exploitation R&D</i>)		74 482
Provisions pour risques et aléas		99 621
Total		412 957

2.5 Coûts d'exploitation



2.5.1 Hypothèses

Le chiffrage des coûts d'exploitation est basé sur les hypothèses de dimensionnement définies par le CEA.

L'évaluation des coûts de personnels et des coûts de traitement de déchets sont basées sur des ratios issus de la Direction de la GESTion du CEA (CEA/DEN/DGES).

L'évaluation des coûts des utilités et servitudes résulte du REX du CEA.

L'évaluation des coûts d'exploitation est basée sur une durée d'exploitation de 34 ans incluant les maintenances du procédé pour l'établissement des points zéro matière à hauteur de 15% du temps total d'exploitation, soit environ 4 ans de temps d'exploitation supplémentaire qui s'ajoutent au 30 d'exploitation brute du procédé.

	<p align="center"><i>Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées</i></p>	<p>CEA/DEN/DADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15</p>
<p align="center">Document technique DEN</p>		<p align="right">Page 20/33</p>



2.5.2 Coût du personnel d'exploitation (natures 10 et 81) -

L'évaluation des coûts des personnels d'exploitation s'est appuyée sur des données issues d'installation semblables (dimensionnement, catégories de personnel...).

Certaines charges sont à prendre en compte. Il s'agit :

- des charges de retraites équivalentes à 1,4% des salaires bruts,
- des charges pour le soutien technique centre, estimées à environ 45% du coût de base d'ETP,
- des charges pour le soutien administratif centre, estimées à environ 35% du coût de base d'ETP.

La prise en compte de ces charges fait croître les coûts du personnel d'exploitation de l'installation (+ 70% environ) à 336 508 k€ sur les 34 ans d'exploitation pris en compte.

	<p align="center">Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées</p>	CEADEN/DADN DO 55 27/02/15  15MVBCC000098 diffusé le: 27/02/15
	Document technique DEN	Page 21/33

2.5.3 Coût des utilités et des consommables (nature 30)

Les utilités et consommables représentent :

- la consommation électrique du bâtiment et du procédé,
- les besoins en gaz (argon, oxygène et azote liquide),
- les besoins en adjuvants de vitrification.

2.5.4 Coût maintenance (nature 30)

Les coûts de maintenance basés sur des données issues de bâtiments similaires du CEA actuellement en exploitation amènent à un coût annuel de 1474 k€/an.

2.5.5 Coût des taxes INB et IRSN (nature 30)

Il est considéré un montant global (taxes INB+IRSN) de 440 k€/an.

2.5.6 Coûts divers (nature 30)

Il s'agit des postes suivants :

- lingerie et nettoyage pour un montant de 21 k€ annuel,
- chauffage pour un montant de 22 k€ annuel,
- télésurveillance pour un montant de 73 k€ annuel.

2.5.7 Dotation pour le démantèlement



La dotation pour le démantèlement de l'installation est estimée à 15% de l'investissement de la conception/réalisation, soit 35 828 k€.

2.5.8 Tableau récapitulatif

Le tableau ci-après récapitule le total des frais d'exploitation estimés pour cette installation.

Synthèse coût exploitation			
		Coût unitaire en kE 2013	Coût global 2013
Exploitation	Nat 10 (+81)	336 509	align="right">701 114
	Nat 30	364 605	
Dotation pour DMT		35 828	35 828

Nota : la nature 10 représente les charges salariales du compte d'exploitation d'une INB CEA. La nature 81 correspond aux charges pour soutien logistique et technique du centre d'appartenance de l'installation. La nature 30 correspond à toutes les charges d'entretien, de maintenance et d'exploitation courante d'une installation.

	Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées	CEADEN/DADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15
Document technique DEN		Page 22/33

2.6 Coûts additionnels

Les hypothèses de coûts de conception / réalisation / exploitation exprimées ci-dessus, sont des hypothèses ne prenant pas en compte certains coûts additionnels qui pourraient augmenter le coût total.

Si pour certaines raisons, l'hypothèse de création d'un entreposage tampon sur site devait être retenue, le coût en serait impacté à la hausse, et cela de manière importante.

L'entreposage type EIP pour l'ensemble du volume de déchets traités représente une solution déjà connue et envisageable.

Dans l'hypothèse de réduction du volume d'un facteur 2 on aurait alors :

- 7 480 m³ = 12 639 colis
- 1 alvéole EIP = contenance de 2 300 m³
- 4 alvéoles EIP seraient donc nécessaires pour entreposer la totalité de la production.
- coût de construction d'une paire d'alvéoles EIP = 30,6 M€ (à doubler pour avoir la capacité d'entreposage adéquate) soit 61,2 M€ pour les deux paires d'alvéoles EIP pour une capacité d'entreposage d'environ 9200 m³.
- coût d'exploitation d'une paire d'alvéoles EIP = 1,019M€/an pour chacune des paires d'alvéoles EIP soit 69,3 M€ pour 34 ans d'exploitation.
- le coût de jouvence décennale pour une paire d'alvéoles EIP s'élève à 3,06 M€ soit 18,34 M€ pour les deux paires pour une période d'exploitation de 34 ans.



Le surcoût de l'entreposage tampon serait alors de 149 M€.

Nota : cette estimation n'est pas prise en compte dans le coût total final de l'étude et ne se substitue pas à la référence d'une expédition en ligne des colis vers l'installation de stockage.

2.7 Coûts des différentes filières envisageables pour les enrobés bitumes à traiter

2.7.1 Coût de stockage des fûts d'enrobés bitume (pas de traitement)

Les fûts de bitume à traiter n'ont pas tous les mêmes caractéristiques radiologiques. L'inventaire se répartit en 28831 fûts de type MAVL et 32901 restants de type FAVL (plus faible activité radiologique).

	Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées	CEADENDADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15
	Document technique DEN	Page 23/33

Les coûts 2013 estimés de mise en stockage de colis de déchets conditionnés issus du CEA sont les suivants :

Hypothèses Déchets

Type déchet	FAVL (en m3 de colis de stockage)	MAVL (en m3 de colis primaire)
Coût unitaire 2013 en k€/m3	7,27566	83,1504

Le coût de stockage, sans traitement, des **61732 fûts** représente donc de l'ordre de **925 millions d'Euros** répartis de la façon suivante (en prenant l'hypothèse, pour les FAVL, d'un colisage final comprenant 4 fûts de colis primaire par colis de stockage de 4,9 m³):

Coût de stockage final des déchets hors traitement

Coût initial hypothèses sans traitement	Type déchet	Nbre fûts	Nbre m3 colis final	Coût du stockage des fût de bitûmes en K€ 2013 sans traitement
	FAVL (en colis de stockage)	32 901	40304	293 236
	MAVL (en colis primaires)	28 831	7600	631 943
	TOTAL	61 732	-	925 179

Si on considère le traitement des déchets bitumineux par le procédé d'incinération/vitrification, deux hypothèses se présentent :



- **l'ensemble des déchets est vitrifié et destiné au stockage MAVL avec un facteur de réduction de 2,**
- **l'ensemble des déchets est vitrifié et la concentration d'activité n'entraîne pas de changement de catégorie de déchets :** les fûts MAVL restent des déchets MAVL et les fûts FAVL restent destinés au stockage sub-surface (FAVL) après traitement.

La production de déchets secondaires de procédé de type TFA ou FMA n'est, à ce stade, ni intégrée ni chiffrée. Elle devra néanmoins être considérée et précisée ultérieurement, notamment en regard des déchets générés par le fonctionnement du traitement des gaz (composés sulfates issus du piégeage des SO_x générés par la décomposition des sels de sulfate de baryum, filtres THE, ...). Des hypothèses sont néanmoins émises pour les déchets d'exploitation liés au traitement des gaz (Cf. §.4.).

2.7.2 Coût de stockage des déchets après traitement – hypothèse 100% MAVL

Il est pris l'hypothèse arbitraire d'un conditionnement des résidus vitrifiés dans un conteneur métallique 0,6 m³ et d'un conditionnement des déchets technologiques en caisson 5m³ remplis aux 3/5^{èmes}.

Le procédé de traitement engendrerait une réduction de volume de 50% : on passerait de 15157 m³ de déchets bitumineux à 7583 m³ de résidus vitrifiés et 12639 conteneurs de 600 L. Les déchets provenant de la structure métallique des fûts pétroliers de volume industriel 230 L représentent 617 caissons 5m³ remplis à 3/5^{ème} soit 1800 m³ de déchets de structure correspondant à un volume de colis final de 3087 m³.

	Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées	CEADENDADN DO 55 27/02/15  15MVBEC000098 diffusé le: 27/02/15
	Document technique DEN	Page 24/33

Coût de stockage final des déchets avec traitement (Hypothèse 100% MAVL)
réduction volume Facteur 2

Coût 100% MAVL après incinération/vitrification	Type déchet	Nbre colis	Nbre m3 colis final	Coût du stockage en K€ 2013 après traitement/vitrification	Coût du stockage des fût de bitumes en K€ 2013 sans traitement
	Caisson 5m3 (FMAVC)	617	3 087	12 781	-
	Conteneurs 600L (MAVL)	12 639	7 584	630 581	-
	TOTAL (FMAVC + MAVL)			643 362	925 179

En considérant un stockage type MAVL pour l'ensemble des colis, le coût total serait de **643 millions d'Euros**.

2.7.3 Coût de stockage des déchets après traitement – hypothèse mixte MAVL-FAVL

Il est pris l'hypothèse arbitraire d'un conditionnement des résidus vitrifiés dans un conteneur métallique 0,6 m³ et d'un conditionnement des déchets technologiques en caisson de 5m³ remplis aux 3/5^{èmes}.

L'hypothèse mixte prévoit que les déchets issus des fûts initialement MAVL restent MAVL et que les déchets issus des fûts FAVL restent FAVL après réduction de volume et concentration d'activité. Par hypothèse, les fûts FAVL de 600L sont placés par 2 dans des colis de stockage béton de 4,9 m³.

Coût de stockage final des déchets avec traitement (Hypothèse Mixte)
réduction volume Facteur 2

Coût mixte après incinération/vitrification	Type déchet	Type colis	Nbre colis	Nbre m3 colis final	Coût du stockage en K€ 2013 après traitement/vitrification	Coût du stockage des fût de bitumes en K€ 2013 sans traitement
	FAVL	Caisson 5m3 (FMAVC)	329	1 645	6 812	
		Conteneurs 600L	6 306	15 450	112 407	
	MAVL	Caisson 5m3 (FMAVC)	288	1 442	5 969	
		Conteneurs 600L	6 346	3 800	315 972	
	TOTAL			441 160	925 179	

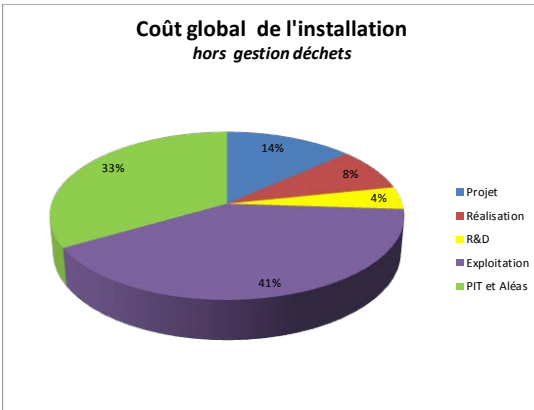
En prenant cette hypothèse, on arrive à un **coût global d'environ 441 millions d'Euros**.

3 COMPARAISON DES SCENARIOS

3.1 Coût de l'Installation de traitement des déchets bitumes (Conception, réalisation, Exploitation, démantèlement)

La répartition des coûts de conception, réalisation et exploitation hors prise en compte de la gestion long terme des déchets est détaillée comme suit :

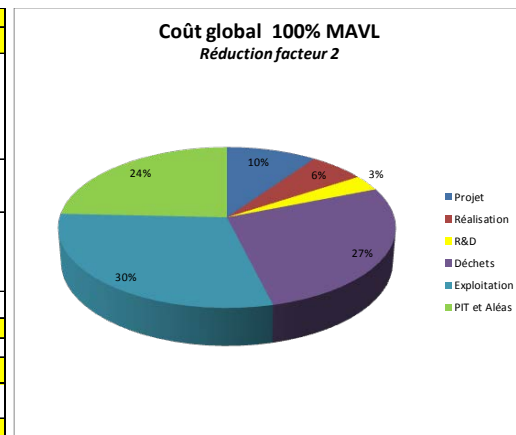
2013				
Thématique	Coût 2013 en k€	% du coût total	Coût thématique	
Projet	MOA	21 540	1,9%	231 134
	MOE	35 002	3,0%	
	Provisions	138 765	12,1%	
	Dotation pour DMT	35 828	3,1%	
Réalisation	Infra.	103 556	9,0%	143 169
	Procédé	39 613	3,4%	
Exploitation	Nat 10	187 452	16,3%	701 114
	Nat 30	364 605	31,7%	
	Nat 61	149 056	13,0%	
R&D	R&D	74 482	6,5%	74 482
TOTAL hors PIT et Aléas		1 149 899 k€		
PIT et Aléas		574 949	50,0%	574 949
TOTAL		1 724 848 k€		



3.2 Coût complet incluant le coût de stockage des déchets ultimes (Scénario 100% MAVL)

Le tableau ci-après récapitule les coûts de ce projet de traitement de colis d'enrobés de boues bitumées en supposant que les résidus de traitement seront des déchets de type MAVL.

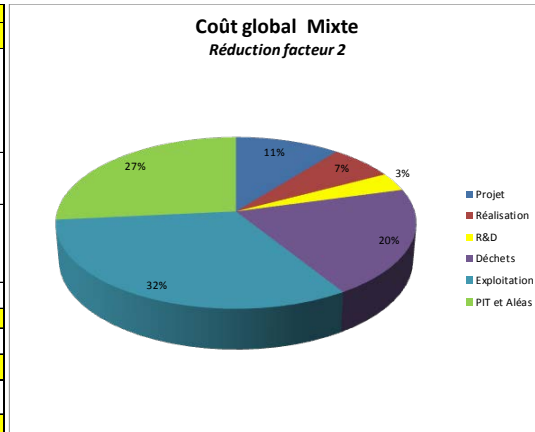
2013				
Thématique	Coût 2013 en k€	% du coût total	Coût thématique	
Projet	MOA	21 540	0,9%	231 134
	MOE	35 002	1,5%	
	Provisions	138 765	5,9%	
	Dotation pour DMT	35 828	1,5%	
Réalisation	Infra.	103 556	4,4%	143 169
	Procédé	39 613	1,7%	
Exploitation	Nat 10	187 452	7,9%	701 114
	Nat 30	364 605	15,4%	
	Nat 61	149 056	6,3%	
R&D	R&D	74 482	3,1%	74 482
TOTAL hors déchets, PIT et Aléas		1 149 899 k€		
PIT et Aléas		574 949	50,0%	574 949
TOTAL hors déchets		1 724 848 k€		
Déchets	FAVL	0	0,0%	643 362
	MAVL	643 362	27,2%	
TOTAL		2 368 210 k€		



3.3 Coût complet incluant le coût de stockage des déchets ultimes (Scénario mixte FAVL + MAVL)

Le tableau ci-après récapitule les coûts de ce projet de retraitement de déchets bitumineux en prenant l'hypothèse de conservation de la catégorie de déchet après traitement.

2013				
Thématique		Coût 2013 en k€	% du coût total	Coût thématique
Projet	MOA	21 540	1,0%	231 134
	MOE	35 002	1,6%	
	Provisions	138 765	6,4%	
	Dotation pour DMT	35 828	1,7%	
Réalisation	Infra.	103 556	4,8%	143 169
	Procédé	39 613	1,8%	
Exploitation	Net 10	187 452	8,7%	701 114
	Net 30	364 605	16,8%	
	Net 61	149 056	6,9%	
R&D	R&D	74 482	3,4%	74 482
TOTAL hors déchets		1 149 899 k€		
	PIT et Aléas	574 949	50,0%	574 949
TOTAL hors déchets		1 724 848 k€		
Déchets	FAVL	119 219	5,5%	441 160
	MAVL	321 941	14,9%	
TOTAL		2 166 008 k€		



3.4 Tableau comparatif global



Comparatif entre scénario sans traitement et scénarios avec traitement (incluant conception/réalisation/exploitation/démantèlement)			
Scénario	Coût total (en K€ 2013)	augmentation du coût par rapport au coût hors traitement (en %)	Part déchet mis en stockage (en K€ 2013)
Scénario de stockage des fûts bitumes sans traitement	925 179		925 179
100% MAVL (Réduction de facteur 2)	2 368 210	156%	643 362
Mixte FA/MAVL (Réduction de facteur 2)	2 166 008	134%	441 160

Il ressort ainsi :

- Que le scénario 1 avec traitement 100% MAVL, visant à un facteur de réduction de volume de 2, représente une augmentation de coût de gestion globale de l'ordre de 156% par rapport au coût de gestion hors traitement qui est égal à 925 M€.
- Que le scénario 2 avec traitement mixte FAVL/MAVL avec un facteur de réduction de volume de 2 représente une augmentation du coût de gestion de l'ordre de 134% par rapport au coût de gestion hors traitement qui est égal à 925 M€.

4 Analyse des Meilleures Techniques Disponibles (MTD)

Dans le cadre de l'arrêté INB (art. 6.1.III), il est attendu la conduite d'étude MTD dès lors que des solutions de traitement (chimique ou thermique) sont envisageables pour des déchets. Les avantages/inconvénients de solutions de traitement de déchets envisageables s'entendent en comparaison d'autres procédés de traitement dans une analyse MTD, mais pas en comparaison d'un stockage direct des fûts de déchets conditionnés et sur-colisés en conteneurs de stockage bétons (colisage assurant des gains supplémentaires en sûreté en phase d'exploitation du stockage). Néanmoins, faute d'autres approches pertinentes, l'exercice de comparaison de type MTD entre une filière de traitement prospectif des fûts de bitume et une filière de référence de stockage des colis de boues bitume (résultant déjà d'une opération industrielle de traitement chimique et thermique) a été conduite. Ses résultats sont exposés ci-après



	Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées	CEADEN/DADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15
Document technique DEN		Page 27/33

Une installation de traitement des boues bitumées nécessiterait le statut « INB », avec une application de l'arrêté INB dès la conception (art. 6.1) :

- I. – « *L'exploitant est responsable de la gestion des déchets (...)*»,
- II. – « *L'exploitant prend toutes dispositions, dès la conception, pour prévenir et réduire les risques (...)*»,
- III. – « *Pour la gestion des déchets, les meilleures techniques disponibles (...)*» :
 - Par "techniques", il est entendu aussi bien les techniques employées que la manière dont l'installation est conçue, construite, entretenue, exploitée et mise à l'arrêt.
 - Par "disponibles", il est entendu les techniques mises au point sur une échelle permettant de les appliquer dans le contexte du secteur industriel ou agricole concerné, dans des conditions économiquement et techniquement viables, en prenant en considération les coûts et les avantages, que ces techniques soient utilisées ou produites ou non sur le territoire de l'Etat membre intéressé, pour autant que l'exploitant concerné puisse y avoir accès dans des conditions raisonnables.
 - Par "meilleures", il est entendu les techniques les plus efficaces pour atteindre un niveau général élevé de protection de l'environnement dans son ensemble.



12 critères MTD (réglementaires) ont été déclinés pour la gestion des déchets radioactifs dans le guide inter-exploitants AREVA-CEA-EDF remis le 1^{er} juillet 2013 à l'ASN, en accord avec cette dernière pour décliner l'arrêté INB. Ils sont les suivants :

1. Utilisation de techniques produisant peu de déchets induits (Déchets de maintenance, d'exploitation et de démantèlement).
2. Utilisation de substances moins dangereuses (Privilégier des procédés sans substances dangereuses).
3. Développement des techniques de récupération et de recyclage des substances émises et utilisées dans le procédé et des déchets, le cas échéant (Existence de filières de recyclage des substances émises par le procédé ainsi que ses équipements connexes de récupération et/ou traitement).
4. Procédés, équipements ou modes d'exploitation comparables, qui ont été expérimentés avec succès à une échelle industrielle. L'organisation des trois principaux exploitants nucléaires français assure une veille technologique (démarche mutualisée et aussi exhaustive que possible).
5. Progrès techniques et évolution des connaissances scientifiques (Innovation, R&D, Retour d'expérience international).
6. Nature, effets et volume des émissions concernées (Etudes d'impacts environnementaux, sanitaires et sociétales, Programme de surveillance de l'environnement des installations).
7. Dates de mise en service des installations nouvelles ou existantes.
8. Durée nécessaire à la mise en place d'une meilleure technique disponible (Délais administratifs, délais d'obtention des agréments colis ANDRA, délais de réalisation technique).
9. Consommation et nature des matières premières (y compris l'eau) utilisées dans le procédé et l'efficacité énergétique (Efficacité énergétique du procédé et préservation des ressources).

	<p align="center"><i>Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées</i></p>	<p>CEADEN/DADN DO 55 27/02/15</p>  <p>15MVBCC000098 diffusé le: 27/02/15</p>
<p align="center">Document technique DEN</p>		<p align="right">Page 28/33</p>



10. Nécessité de prévenir ou de réduire à un minimum l'impact global des émissions et des risques sur l'environnement (émissions chimiques et radiologiques, liquides et gazeuses). Principe ALARA pour les émissions radiologiques, principe de réduction, compensation ou assainissement pour les émissions chimiques.
11. Nécessité de prévenir les accidents et d'en réduire les conséquences sur l'environnement (Etude de dangers pour les ICPE, Etude de Maitrise des Risques et Rapport de Sûreté pour les installations nucléaires).
12. Informations publiées par la Commission en vertu de l'article 16, paragraphe 2, de la directive 2008/1/CE du 15 janvier 2008 ou par des organisations internationales : ce critère est non applicable.
- 12.(bis) Nouveau critère : Impact du procédé sur l'exutoire «déchets» (Disponibilité de l'exutoire, préservation de la capacité de stockage).

Le résultat de l'analyse MTD réalisée est reporté dans le tableau suivant en notant les procédés de traitement thermique en comparaison au scénario de référence industrielle du stockage géologique.



	Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées	CEADENDADN DO 55 27/02/15  15MVBCC000098 diffusé le: 27/02/15
Document technique DEN		Page 29/33

Analyse selon les critères MTD



Critères MTD	Notation <i>(Très Favorable, Favorable, Neutre, Défavorable)</i>	Commentaires
1. Limitation des déchets induits	Défavorable	<p>Des quantités de déchets d'exploitation d'une installation d'incinération-vitrification vont être générées, notamment :</p> <ul style="list-style-type: none"> par les opérations régulières de chasse matière en vue de maîtriser le risque criticité, lors du changement des torches à plasma (composants consommables), par les opérations de jouvences de tous les autres composants du cœur de procédé, par les opérations de changement des filtres THE, etc... (quantités non évaluées à ce stade de déchets de nature FAMA), des déchets TFA induits par les opérations de traitement des gaz (notamment du sulfate de calcium à hauteur de l'ordre de 1000 tonnes) des déchets TFA/FAMA induits par le conditionnement des enveloppes métalliques des fûts primaires d'enrobés de boues bitumées des déchets TFA (majoritairement) issus du démantèlement des installations nucléaires d'incinération-vitrification (non quantifiés à ce stade)
2. Substances dangereuses utilisées	Neutre	A ce stade, les deux « filières » ne présenteraient pas de procédé utilisant de nouvelles substances dangereuses
3. Récupération et recyclage	Neutre	Il n'y a pas d'intérêt identifié à récupérer les composés présents dans les fûts d'enrobés de boues bitumées, à des fins de recyclage
4. Modes d'exploitation comparables, expérimentés avec succès	Très Défavorable	<ul style="list-style-type: none"> Inexistant : il n'existe pas de REX industriel disponible d'opération en environnement nucléaire télé-opéré d'un procédé d'incinération-vitrification de colis de déchets FAVL/MAVL d'enrobés de boues bitumées. L'expérience industrielle en milieu nucléaire est très limitée pour des déchets de catégorie FMA-

	<p align="center">Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées</p>	<p>CEADENDADN DO 55 27/02/15</p>  <p>15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15</p>
<p align="center">Document technique DEN</p>		<p align="right">Page 30/33</p>



		<p>VC et inexistante pour les déchets FAVL. Une première unité de traitement plasma pour déchets TFA organiques (polymères) est entrée en opération commerciale en 2004 en Suisse, pour des déchets d'exploitation de réacteurs de puissance : il n'existe pas de REX transposable pour des déchets de catégorie FAVL et MAVL, constitués de mélanges de radionucléides émetteurs α, β et γ, ni pour des colis de déchets conditionnés et déjà constitués tels que les fûts d'enrobés bitume.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Des colis d'enrobés de boues bitumées de catégorie radiologique FAMA ont été stockés dans le passé au centre Manche (CSM, actuellement sous surveillance post-exploitation). Des colis de boues bitumées FAMA produits à la STEL-Marcoule, analogues physico-chimiquement à ceux de catégorie MAVL/FAVL, sont également stockés au centre de l'Aube en activité, en toute sûreté et sécurité. • Il apparaît la nécessité de maîtriser des risques d'exploitation significatifs pour les processus d'incinération-vitrification (cf. critères 11), comparativement à ceux d'une installation de stockage mettant en œuvre pour l'essentiel des procédés de manutention et de surcolisage essentiellement, puis des dispositifs de surveillance passive.
<p>5. Progrès techniques et évolution des connaissances scientifiques</p>	<p>Défavorable</p>	<p>Il s'agirait de déployer des concepts innovants de traitement thermique pour des colis de déchets FAVL et MAVL à l'échelle d'un procédé industriel, en vue de lever les incertitudes pesant sur la maîtrise du risque de criticité et la maîtrise de la réactivité thermique des sels dans le four.</p> <p>Il n'y a pas d'innovation technologique à déployer pour conditionner des fûts d'enrobés de boues bitumées dans des colis de stockage en béton en vue d'un stockage géologique dans des alvéoles.</p>
<p>6. Nature, effets et volume des émissions</p>	<p>Défavorable</p>	<p>Un procédé d'incinération vitrification induirait un accroissement significatif des émissions gazeuses chimiques et potentiellement toxiques liées à la décomposition thermique du bitume et des sels de co-</p>

	<p align="center">Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées</p>	<p>CEADENDADN DO 55 27/02/15</p>  <p>15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15</p>
<p align="center">Document technique DEN</p>		<p align="right">Page 31/33</p>

		<p>précipitation (torche à plasma, gestion des gaz).</p> <p>Par exemple, l'incinération des fûts de bitume libérerait environ 30 000 tonnes de CO₂ dans l'atmosphère (ce qui ne serait pas le cas pour le scénario de mise en stockage géologique).</p>
<p>7. Dates de mise en service des installations</p>	<p>Défavorable</p>	<p>Il s'agirait d'étudier puis de réaliser une installation nucléaire abritant un cœur de procédé nouveau testé uniquement au niveau expérimental (à considérer avec le critère 8) avec un fort risque planning pour les autorisations administratives et enquêtes publiques</p>
<p>8. Durée nécessaire à la mise en place d'une MTD</p>	<p>Très Défavorable</p>	<p>Une phase de R&D amont de 10 ans serait nécessaire en vue de lever les verrous technologiques, avant de pouvoir ensuite initier une phase projet de conception (esquisse, APS/APD), construction et exploitation.</p> <p>Les délais administratifs d'obtention des autorisations et des agréments ne sont pas estimés à ce stade. Les incertitudes sont élevées.</p>
<p>9. Consommation et nature des matières premières (y compris l'eau) utilisées dans le procédé et l'efficacité énergétique</p>	<p>Défavorable</p>	<p>Le coût énergétique d'un procédé thermique est élevé, pour une préservation éventuelle des ressources en bétons de colisage (opportunité de stocker les colis MAVL de déchets vitrifiés directement, sans surcolisage béton).</p> <p>Une consommation d'acier réfractaire pour les conteneurs primaires des déchets issus d'un procédé de vitrification sera nécessaire (hypothèse enveloppe : 200kg d'acier par colis primaire de 0.6m³, pour 12500 colis, soit 2500 tonnes d'acier réfractaire).</p>
<p>10. Nécessité de prévenir ou de réduire à un minimum l'impact global des émissions et des risques sur l'environnement</p>	<p>Défavorable</p>	<p>Un procédé de traitement thermique accroît les émissions chimiques et radiologiques dans l'environnement, comparativement à la filière de stockage du colis de déchet d'enrobés de boues bitumées, en scénario normal d'exploitation. Ceci constitue un risque majeur pour l'enquête publique</p>
<p>11. Nécessité de prévenir les accidents et d'en réduire les conséquences sur l'environnement</p>	<p>Défavorable</p>	<p>Pour l'opération de traitement thermique, Il n'y a pas d'étude de Maitrise des Risques ni de rapport de Sûreté établis pour une installation d'incinération/vitrification de déchets FAVL/MAVL : la nature des risques additionnels n'est pas définie ni maîtrisable à ce stade mais il est a minima identifier la nécessité de maîtriser des risques d'incendie, d'explosion H₂, de criticité, pour</p>

	<p>Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées</p>	<p>CEA/DEN/DADN DO 55 27/02/15 15MVBCC000098 diffusé le: 27/02/15</p> 
<p>Document technique DEN</p>		<p>Page 32/33</p>

		<p>les travailleurs et l'environnement. Les résultats des études du programme conjoint Andra/CEA/AREVA/EDF sur le comportement des colis de boues bitumées en situation incidentelle d'incendie en condition de stockage montrent une maîtrise des risques. Les résultats du programme d'étude démontrent l'absence de dégradation des colis d'enrobés, du fait de l'absence d'auto-échauffement et d'auto-inflammation.</p>
<p>12. Informations publiées par la Commission : non retenu</p>	<p>non applicable</p>	
<p>12. Bis. Impact du procédé sur l'exutoire : Disponibilité et Préservation de la capacité de stockage</p>	<p>favorable</p>	<p>En première approximation, une réduction de la capacité de stockage (FAVL et MAVL) d'un facteur 2 est à retenir.</p>

	Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement thermique d'enrobés de boues bitumées	CEADENDADN DO 55 27/02/15  15MVBCC00098 diffusé le: 27/02/15
Document technique DEN		Page 33/33

5 CONCLUSION

L'ensemble des éléments de l'étude conduit aux conclusions suivantes :

- **La faisabilité de l'incinération/vitrification des enrobés bitumés de catégorie FAVL et MAVL n'est pas techniquement atteignable à ce jour.**
- Des verrous majeurs à lever en termes de procédé et de technologie de traitement ont été identifiés. Une R&D dédiée de l'ordre de 10 ans serait indispensable pour évaluer les capacités de levée des verrous technologiques, et des verrous de procédé. Ces verrous conduisent à un risque industriel très conséquent.
- Le risque industriel associé au traitement par incinération/vitrification des colis d'enrobés de boues bitumées est liée, en l'état actuel de la connaissance, à une absence de maîtrise du prétraitement des fûts d'enrobés pour alimenter le cœur de procédé thermique, à la non maîtrise d'un traitement des gaz et à la non connaissance de la maîtrise d'autres risques induits en fonctionnement (incendie, explosion). Il convient également de souligner l'absence de dispositifs de gestion en ligne des matières fissiles sur un cœur de procédé de fusion, ainsi que de l'absence de connaissance sur leur répartition dans une chambre de combustion (four), en vue de maîtriser le risque de criticité, et enfin à une absence de maîtrise de la gestion des réactions d'oxydo-réduction dans le cœur de procédé (bain fondu). Il serait ainsi également nécessaire de définir un ensemble de dispositifs de prévention, surveillance et mitigation des risques liés à l'exploitation d'un procédé de traitement des colis d'enrobés de boues bitumées, dont le coût n'est pas chiffré à ce stade.
- Une analyse de risque de type MTD (Meilleure Technique Disponible), faisant appel à 12 critères, a été conduite. Elle souligne le caractère défavorable du traitement, en regard des risques et incertitudes techniques, comparativement au stockage en site géologique des colis d'enrobés de boues bitumées qui est beaucoup plus passif.
- Il ressort à ce jour qu'un procédé de traitement s'avérerait complexe, incertain et coûteux, pour une économie potentielle d'une capacité de stockage géologique de 7500m³ environ (facteur 2 de réduction de volume à stocker).

Enfin, le coût spécifique (en valeur brute) de l'installation de traitement (conception, réalisation, exploitation, démantèlement) est estimé à 1150 M€_{CE2013}. Une incertitude de 50% est à prendre en compte à ce stade, et conduit donc à un chiffrage de 1725 M€_{CE2013} hors coût de stockage des résidus ultimes.

Sur la base de l'atteinte d'un facteur de réduction de volume égale à 2, le coût spécifique associé à la mise en stockage MAVL de l'ensemble des résidus de traitement serait égal à 643 M€_{CE2013}.

Le coût total (traitement + stockage) est ainsi estimé à 2368 M€_{CE2013} soit une augmentation de 156% par rapport au coût actuel de mise en stockage MAVL et FAVL de ces déchets.