

Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs 2016-2018

Article 28

Etude de faisabilité technico-économique de la fusion de déchets métalliques TFA en vue de leur densification

SOMMAIRE

1. CONTEXTE.....	3
2. OBJET.....	4
3. RÉFÉRENCES.....	4
4. DESCRIPTION DE LA FILIERE DE FUSION DENSIFIANTE.....	5
A. DANS LES INSTALLATIONS NUCLEAIRES EN DEMANTELEMENT	7
B. DANS UNE EVENTUELLE INSTALLATION DE CONDITIONNEMENT	7
C. DANS L'INSTALLATION DE FUSION	8
5. INSTALLATION DE TRAITEMENT DES METAUX TFA PAR FUSION	9
A. ENTREPOSAGE / RECEPTION USINE.....	10
B. PREPARATION DES PANIERS POUR FUSION.....	10
C. FUSION FOUR ELECTRIQUE	11
D. COULEE DES LINGOTS.....	13
E. MAINTENANCE ET EFFLUENTS	13
F. ENTREPOSAGE SORTIE USINE.....	14
6. COMPARAISON TECHNIQUE & QUALITATIVE DES FILIERES DE FUSION	15
A. TRI DES EQUIPEMENTS.....	15
B. DECONTAMINATION AMONT	16
C. PROCEDE DE FUSION ET AFFINAGE	17
D. INCIDENCE DES DECHETS INDUITS.....	18
E. FINALITE DES PRODUITS DE FUSION.....	19
F. ANALYSE COMPARATIVE DES DIFFERENTES SOLUTIONS EN VOLUMES TFA STOCKES.....	20
G. INFORMATION SUR ESTIMATION ECONOMIQUE.....	24
7. ANALYSE DES CRITERES D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT	25
A. IMPACT PRINCIPAL SUR L'ENVIRONNEMENT	25
B. AUTRES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT	25
C. ANALYSE SELON LES CRITERES MTD (MEILLEURS TECHNIQUES DISPONIBLES) : FILIERES STOCKAGE DIRECT VERSUS FUSION DENSIFIANTE ET FUSION VALORISATION	28
8. CONCLUSION	29

1. CONTEXTE

L'analyse des prévisions actuelles de stockage de déchets de Très Faible Activité (TFA) indique que d'ici une dizaine d'années, la capacité administrative actuelle de 650 000 m³ du Centre Industriel de Regroupement d'Entreposage et de Stockage (Cires) sera atteinte.

Au regard des enjeux que représente le démantèlement du parc actuel en terme de déchets TFA, le PNGMDR 2016-2018 demande d'étudier plusieurs options visant à optimiser les volumes de déchets TFA à stocker.

Ces demandes s'inscrivent pleinement dans les principes énoncés par la loi de 2015 relative à la Transition Ecologique pour la Croissance Verte (TECV) et retranscrites dans le Code de l'Environnement, à savoir la hiérarchisation des modes de gestion des déchets avec pour objectif de limiter le stockage des déchets ultimes comme l'illustre la figure 1 ci-dessous.

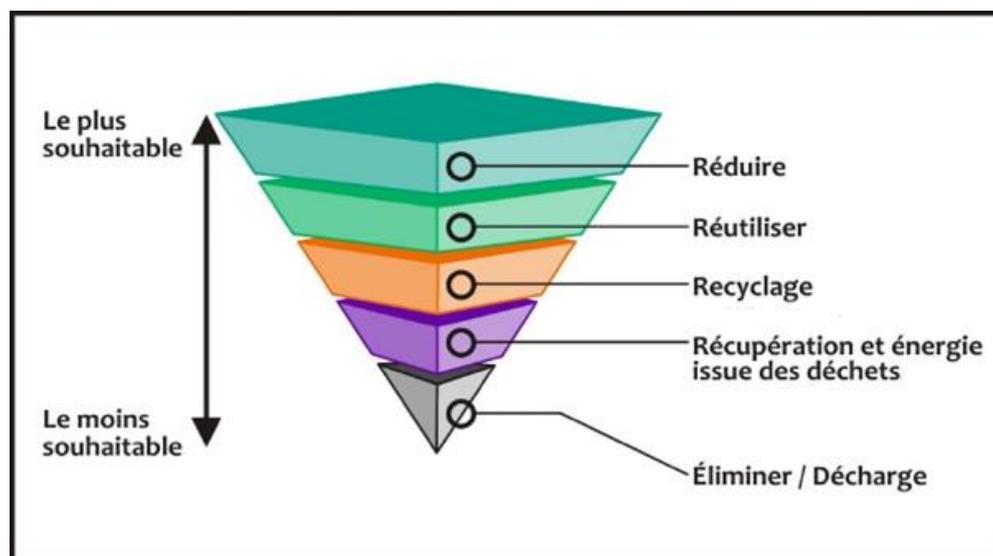


Figure 1. Hiérarchie des modes de gestion des déchets en France

A ce titre, les scénarios permettant de réduire les quantités de déchets TFA constituent des options à privilégier.

Leur réduction est notamment permise par une optimisation du zonage déchets (étudiée à l'article 21 de l'arrêté PNGMDR) ou un assainissement proportionné aux enjeux (étudié à l'article 20 de l'arrêté PNGMDR).

Le recyclage d'une partie des déchets TFA (étudié notamment à travers l'article 24 de l'arrêté PNGMDR) permet également de préserver les capacités de stockage.

Enfin, en dernier recours, une optimisation des volumes des déchets destinés à être stockés au

PNGMDR Article 28 - étude de faisabilité technico-économique de la fusion de déchets métalliques TFA en vue de leur densification

Cires est à rechercher. Celle-ci est étudiée dans le cadre du PNGMDR au travers des articles 25 (incinération), 27 (densification mécanique) et 28 (fusion pour densification, objet du présent document).

2. OBJET

Ce document répond à l'article 28 de l'Arrêté du 23 février 2017, pris pour application du décret n° 2017-231 du 23 février 2017 établissant les prescriptions du Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR) :

« Les producteurs de déchets métalliques TFA et SOCODEI, en lien avec l'ANDRA, remettent au ministre chargé de l'énergie avant le 30 juin 2018 une étude de la faisabilité technico-économique de la fusion de déchets métalliques TFA en vue de leur densification. Cette étude intègre les impacts sur l'environnement. L'ASN est saisie pour avis sur cette étude. »

Pour alimenter l'étude technico-économique demandée, nous avons mis en perspective les différentes solutions de gestion envisageables pour les déchets métalliques TFA.

Le document s'articule ainsi :

- Description de ce que serait une filière de fusion densifiante.
- Analyse comparative des différentes options que constituent le stockage direct, la fusion densifiante en vue du stockage TFA à l'Andra et la fusion et valorisation des matériaux métalliques.
- Enfin, l'étude propose une analyse qualitative des facteurs d'impacts sur l'environnement.

3. RÉFÉRENCES

- Dossier en réponse à l'article 24 de l'arrêté du 23 février 2017 PNGMDR 2016-2018 – « Traitement et valorisation des grands lots homogènes de matériaux métalliques TFA provenant de l'usine Georges Besse Eurodif et des GV du parc EDF »

4. DESCRIPTION DE LA FILIERE DE FUSION DENSIFIANTE

Le document répondant à l'article 24 de l'arrêté PNGMDR (en référence) étudie le traitement et la valorisation des grands lots homogènes de métaux TFA issus de l'usine Georges Besse (GB1) et des Générateurs de Vapeur (GV) du parc EDF.

Comme présenté plus loin, une grande partie des moyens pour mettre en œuvre cette solution de valorisation pourrait être analogue à ceux nécessaires à une filière de fusion densifiante. Pour cela, une comparaison des 2 solutions au regard du stockage sera proposée dans ce document.

La hiérarchisation précisée par la loi et illustrée dans la figure 1 doit s'appliquer, à savoir privilégier, quand applicable, une solution de recyclage à une solution de stockage.

Nota 1 : l'intitulé de l'article 28 concerne « des déchets métalliques TFA ». Le document proposé va analyser la gestion de métaux ferreux (aciers ferritiques et inoxydables). Les autres alliages non ferreux (tels que aluminium, cuivre ou plomb par exemple) ne sont pas considérés dans cette analyse. En particulier, le plomb est traité via l'article 33 de l'Arrêté PNGMDR.

Nota 2 : ce document n'a pas vocation à analyser les gisements de référence en matériaux métalliques ferreux qui feront l'objet d'une réévaluation lors du prochain schéma industriel. Il est cependant clair qu'il existe des incertitudes à la fois dans les volumes à considérer ainsi que leur chronique de mise à disposition dans le temps.

Le schéma simplifié de la filière est représenté par la figure 2 ci-après avec 3 phases d'activités situées dans des lieux différents :

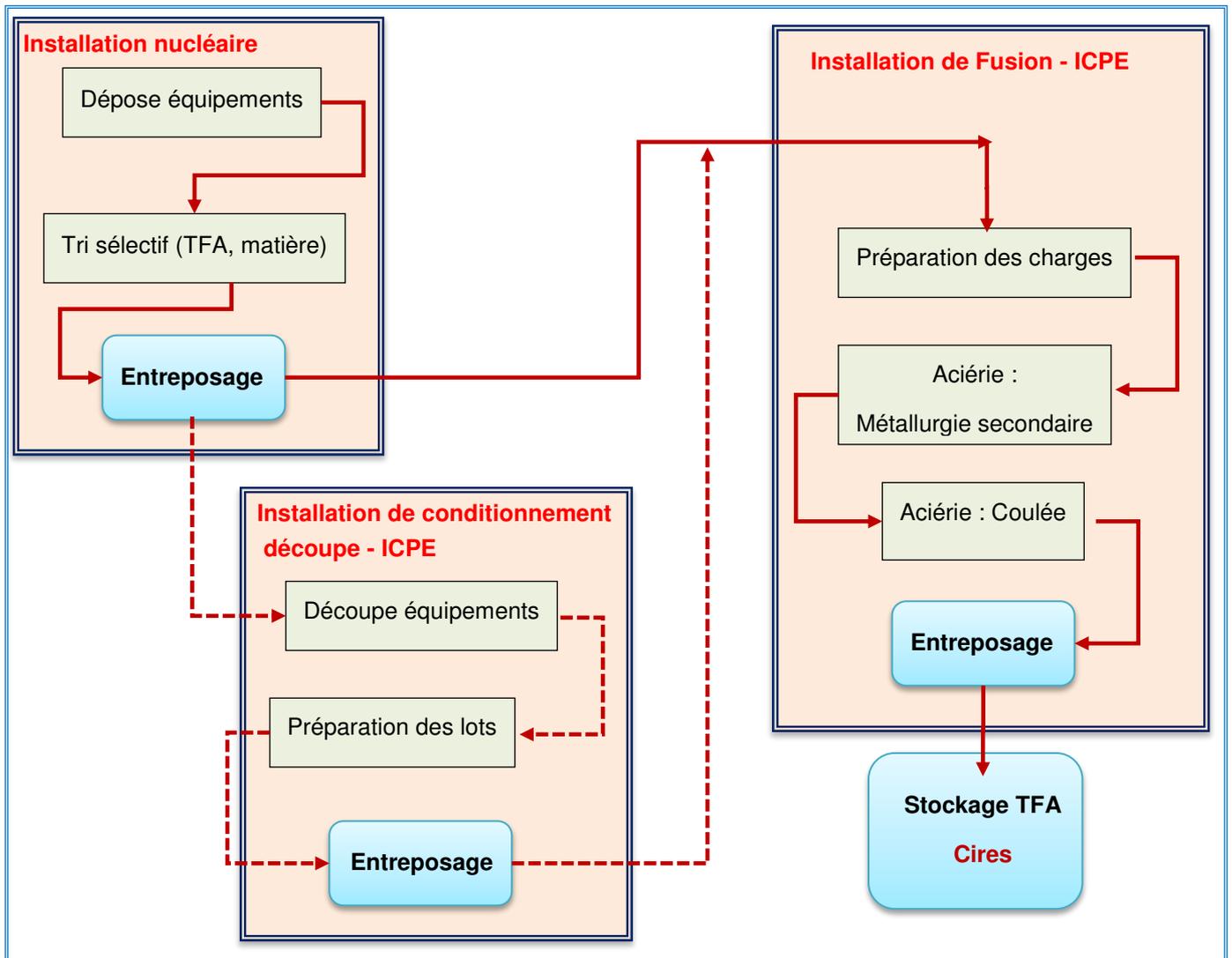


Figure 2. Etapes de réalisation de la fusion densifiante

A. DANS LES INSTALLATIONS NUCLEAIRES EN DEMANTELEMENT

Ceci concerne la dépose des équipements métalliques, leur mesure d'activité et leur premier tri. Selon les moyens techniques mis en œuvre pour le démantèlement des installations, adaptés aux locaux et encombrements des équipements, il conviendra de réaliser une identification des produits afin de réaliser 2 types de tri :

- Tri physique : en complément de la séparation entre les métaux et les autres composants non métalliques, séparer les métaux ferreux des métaux non ferreux ou de métaux ferreux non éligibles en mélange
- Tri radiologique : séparer les éléments TFA des autres composants relevant d'un stockage FMA-VC.

De même, les moyens de dépose et de découpe utilisés sur le site permettront de préparer le conditionnement des colis qui partiront du site en containers fermés (de type IP2 fermés ISO-volume 33 m³).

Selon les flux sortants de l'installation nucléaire, il sera probablement nécessaire de prévoir des aires d'entreposage pour préparer les lots avant leur expédition.

Ces aires pourront être de 2 types :

- entreposage en vrac des équipements déposés mais encore dans des locaux sous ventilation nucléaire de l'Installation nucléaire,
- entreposage à l'intérieur des containers IP2, remplis dans l'installation ventilée puis stockés et gerbés en entreposage extérieur situé dans l'enceinte de l'installation nucléaire, d'une autre installation nucléaire, d'une ICPE du même site ou d'une aire dédiée dans le périmètre du site nucléaire concerné.

B. DANS UNE EVENTUELLE INSTALLATION DE CONDITIONNEMENT

Ceci concerne la découpe des équipements et le conditionnement en charges compatibles avec l'installation de fusion ainsi qu'un entreposage intermédiaire.

Pour des raisons pratiques et dans un souci économique de rationalisation des coûts, il pourra être nécessaire de créer une installation centralisée de préparation qui sera capable de mettre au gabarit les équipements de grosses dimensions qui n'auront pas pu être morcelés par les outillages de dépose mis en œuvre dans l'installation nucléaire.

Pour optimiser l'investissement de la filière, la logique voudrait que cette installation centralisée de conditionnement soit adjacente à l'installation de fusion pour éviter des transports inter sites.

Dans ces conditions, une installation centralisée de découpe des équipements de fort gabarit pourra être nécessaire : elle recevra par exemple des gros actionneurs comme des vannes ou groupes moto pompes, des réservoirs ou échangeurs ainsi que des éléments de tuyauteries de gros diamètre.

Nota 1: Plusieurs choix sont à la main de l'exploitant en fonction des spécificités de sa stratégie de démantèlement (par exemple, appropriation de locaux déjà démantelés et mise en place de moyens de découpe, utilisation d'une installation existante adaptée à certains équipements à traiter mais pas adjacente à l'usine de fusion...).

Nota 2: Il existe déjà en France des retours d'expérience sur la nucléarisation d'équipements de découpe de ce type (Exemple ERV : Equipement de Réduction de Volume équipé d'une presse/cisaille pour le conditionnement des déchets issus du démantèlement des Usines de Diffusion Gazeuse du site de Pierrelatte).

Ces équipements pourront être livrés vers cette installation de découpe à l'intérieur de containers IP2 ou pour les pièces de grandes dimensions via des transports dédiés.

Cette installation de découpe, de type Installation Classée Pour l'Environnement (ICPE), équipée de machines de sciage, de moyens de découpe thermique et d'usinage, permettra de fragmenter les équipements en morceaux compatibles avec les dimensions du four qui sera utilisé dans l'installation de fusion.

L'installation servira aussi à une séparation de parties ou d'accessoires attachés à l'équipement livré et qui seront évacués vers la filière de stockage TFA sans passage par une fusion densifiante (tri de nature physique). Elle pourra être capable éventuellement de trier des parties d'équipements mixtes TFA / FMA-VC avec des adressages différents selon les 2 types de déchets après séparation (tri de nature radiologique).

Cette installation contiendra également une aire d'entreposage tampon avec gerbage de containers IP2, à la fois en entrée en provenance des INB et en sortie en attente de transport vers l'installation de fusion ou vers le stockage direct au Cires.

Nota : Les équipements de faible gabarit pourraient être directement acheminés des installations nucléaires vers l'usine de fusion densifiante sans transiter par cette installation intermédiaire.

C. DANS L'INSTALLATION DE FUSION

Ceci concerne les opérations de préparation des charges puis la métallurgie secondaire avant coulée des matériaux métalliques dans des fûts chemisés adaptés à leur stockage ultérieur. Cette installation intègre une zone d'entreposage aval avant transport.

Celle-ci va être décrite dans le chapitre suivant.

La dernière étape de cette filière sera le transport des colis des métaux densifiés vers le Cires.

5. INSTALLATION DE TRAITEMENT DES METAUX TFA PAR FUSION

Le process retenu serait celui de la fusion de l'acier à traiter dans un **Four Electrique à Arc (FEA) ou à Induction (FI)** à 1650 °C (décrit plus loin dans ce chapitre). L'acier entrant, chargé d'impuretés et de composés faiblement radioactifs, devient liquide à haute température. Deux phases se forment :

- Le laitier de densité plus faible en surface. Les impuretés, certains radioéléments et les poussières migrent dans le laitier et sont séparés du métal fondu par une opération de décrassage
- Le métal plus lourd reste en partie inférieure

Le métal est ensuite transféré en poche avant sa coulée dans des fûts chemisés pour stockage.

Nota : le livrable article 24 relatif à la fusion valorisation de grands lots homogènes de métaux TFA privilégie l'utilisation d'un Four Electrique à Arc pour la valorisation pour des raisons techniques (confinement, traitement de matière associée aux ferrailles (peinture...)).

Dans notre cas, les 2 technologies (Arc – Induction) seraient envisageables et resteront du choix de l'investisseur.

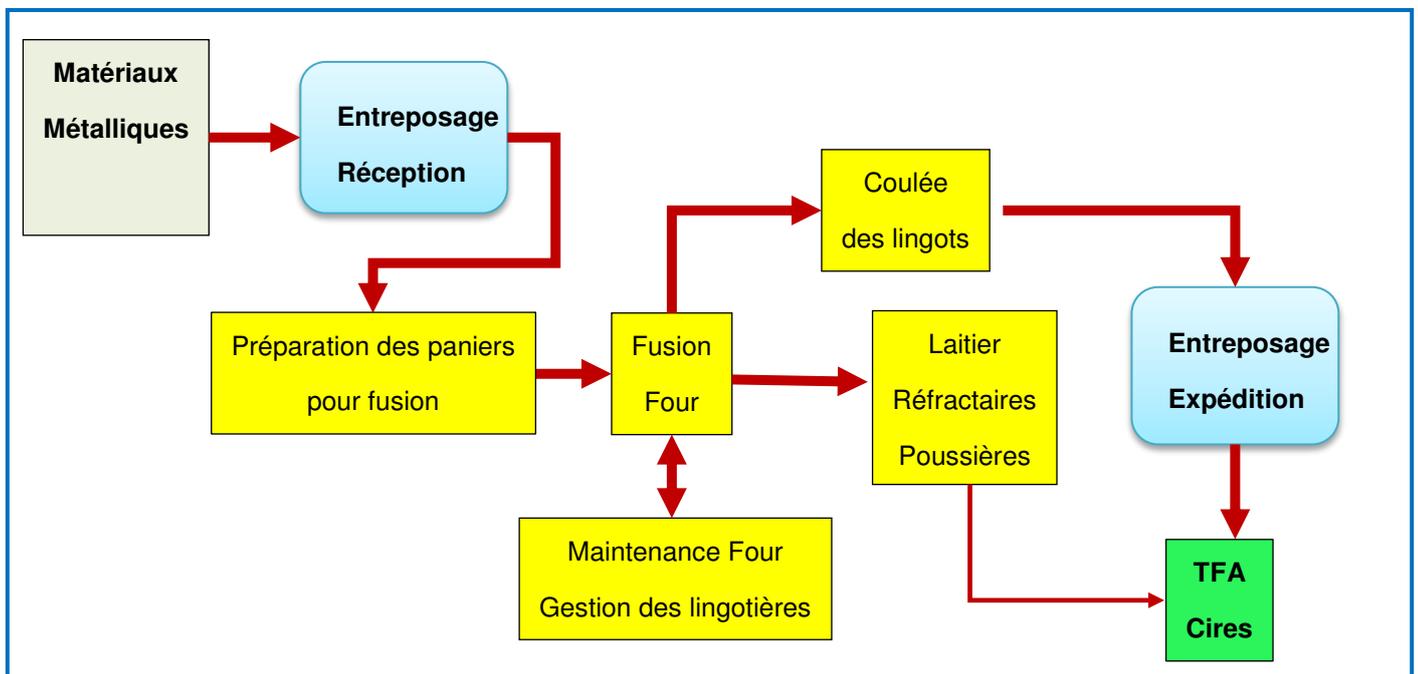


Figure 3. Détail de l'installation de fusion

A. ENTREPOSAGE / RECEPTION USINE

Les containers IP2 seront déchargés des camions de transport, entreposés et gerbés dans une aire d'entreposage « Réception usine ». Cette aire pourra être extérieure, les containers assurant le confinement des matériaux métalliques. Un contrôle radiologique sera assuré.

Cette aire pourra éventuellement servir aussi d'entreposage « Sortie Usine » pour les produits de sortie déjà en containers.

Cette aire contiendra les équipements de levage (ponts – Fenwick ...) et de manutention.

Les containers seront ensuite introduits dans l'installation de fusion afin de procéder au déchargement et transfert vers les paniers.

B. PREPARATION DES PANIERS POUR FUSION

Les opérations d'ouverture des containers seront réalisées dans le bâtiment attenant sous confinement nucléaire avec ventilation et émissaire de rejets gazeux.

Les ferrailles seront déchargées des containers et seront :

- soit entreposés dans des emplacements vrac d'entreposage de ferraille,
- soit directement pré-conditionnées dans les paniers de transfert vers le four de fusion.

Les containers ainsi vidés seront ensuite nettoyés avec un contrôle radiologique interne. Selon les besoins, une décontamination / élimination de point chaud résiduel pourra être menée. Ceux-ci seront sortis du bâtiment et entreposés dans l'aire d'entreposage réception.

En préparation à la coulée, les ferrailles seront conditionnées dans des paniers de transfert, qui seront dimensionnés en cohérence avec la capacité intrinsèque du four. Les paniers ainsi remplis de ferraille feront l'objet d'une pesée.

Les opérations de fusion densifiante qui seront menées sur ces ferrailles n'ont pas vocation à fournir des nuances d'aciers de qualité : il n'est donc pas prévu d'opération d'affinage ni de « mise à nuance ». Néanmoins, afin de faciliter les opérations de fusion ou pour des raisons de sécurité, des additifs de coulée pourront être ajoutés à la charge dans le panier pour ajuster la fluidité du laitier par exemple.

Sous le pilotage de l'opérateur de coulée, les paniers seront mis en attente d'insertion dans le four électrique. Selon le choix technologique mis en œuvre, la manutention des paniers pourra être faite par convoyeur ou pont roulant.

C. FUSION FOUR ELECTRIQUE

Deux types de technologie de fours ont été évalués : Le Four Electrique à Arc (FEA) et le Four à Induction (FI).

a) Four électrique à arc :

Un four à arc est un four électrique mis en œuvre en métallurgie qui utilise l'énergie thermique de l'arc électrique établi entre une (ou plusieurs) électrode(s) de carbone et le métal pour obtenir une température suffisante à sa fusion.

De petite (environ une tonne) ou grande capacité (jusqu'à 400 t), il est principalement utilisé pour la production d'acier liquide (environ 35 % de la production mondiale) et aussi pour le recyclage des métaux.

Les fours électriques à arc utilisés en sidérurgie ont l'intérêt de recycler les ferrailles et permettent de faire fondre des matériaux de moins bonne qualité. Ceci constitue un avantage en termes de recyclage des métaux, mais requiert un système approprié de captage et d'épuration des effluents gazeux.

Le risque d'entraîner la présence d'impuretés non désirables est minime et parfaitement maîtrisé par l'aciériste (le tri et la sélection des ferrailles permettent d'éliminer les ferrailles suspectes). La qualité des ferrailles introduites est choisie en fonction des exigences sur le produit fini. L'aciériste peut utiliser des lots homogènes dont il connaît l'historique, par exemple des chutes de fabrication au laminage. Actuellement, les produits pour lesquels les exigences sont les plus grandes, telles que des pièces pour le nucléaire et l'aéronautique, sont issus de coulées au FEA, complétées éventuellement par des traitements (dégazage) par le vide et des traitements en poche chauffante. Ainsi le four électrique est loin d'être réservé aux produits les moins exigeants. Il est au contraire utilisé aussi pour produire les aciers de plus haute qualité.

Un autre avantage du FEA est sa capacité à fondre des morceaux métalliques de grande dimension (de la dimension du four) sans passer par une phase préalable de réduction par découpe. Dans ce cas, des pièces de grand gabarit seraient acheminées vers le four par le pont roulant.

b) Four électrique à induction :

Un four à induction est un four électrique fonctionnant grâce au phénomène de chauffage par induction de métal. L'avantage de ce procédé est qu'il est économe en énergie et permet de mieux contrôler la fusion des métaux. Les fonderies modernes utilisent ce type de four qui supplante les hauts fourneaux pour produire la fonte, car ces derniers émettent beaucoup de poussières. Pour l'exploitation des fours à induction, la meilleure technique disponible (MTD) consiste à faire fondre des déchets propres, en évitant les charges rouillées et sales et le sable collant.

Les capacités des fours à induction varient de moins d'un kilogramme à cent tonnes. Ils sont utilisés pour fondre le fer et l'acier, le cuivre, l'aluminium et les métaux précieux. Comme aucun arc ni aucune combustion ne sont utilisés, la température de la matière n'est pas supérieure à celle requise pour le faire fondre, ce qui permet de prévenir la perte des éléments d'alliage précieux.

L'inconvénient majeur à l'utilisation du four à induction dans une fonderie est l'absence de raffinage dans le phénomène : les matériaux de charge doivent être exempts de tous produits d'oxydation et d'une composition connue, et certains éléments d'alliage peuvent être perdus en raison de l'oxydation (ils doivent alors être rajoutés après-coup à la fonte). Les fréquences opérationnelles vont de 50 - 60 Hz à 400 kHz ou plus, en fonction du matériau à fondre, du volume du four et de la vitesse de fusion requise.

A priori, il n'est pas prévu pour la fusion densifiante de mise à nuance donc il n'y aura pas de passage par une phase d'affinage ultérieure via un four à poche ou d'affinage tel que par exemple l'introduction d'additifs dans le four, le calmage de l'acier, son dégazage et l'ajustement du laitier de poche.

c) Éléments militants pour le Four électrique à arc :

Le choix du four à arc par rapport à l'induction peut être motivé par les éléments suivants :

- Le traitement d'aciers de démantèlement hétérogènes dans certains cas (présence d'accompagnants en quantité qui rend inexploitable le four à induction : non conçu pour travailler avec beaucoup de laitiers)
- Le confinement de la matière lors de la fusion (fusion de la charge en voûte fermée)
- L'aspect sécurité sans personnel autour du four lors des chargements
- Un grand diamètre qui permet d'introduire de grandes pièces unitaires (ou de grandes dimensions) à raison d'un tiers avec du vrac et sans assistance d'opérateur autour du four.

Par opposition, pour le four à Induction :

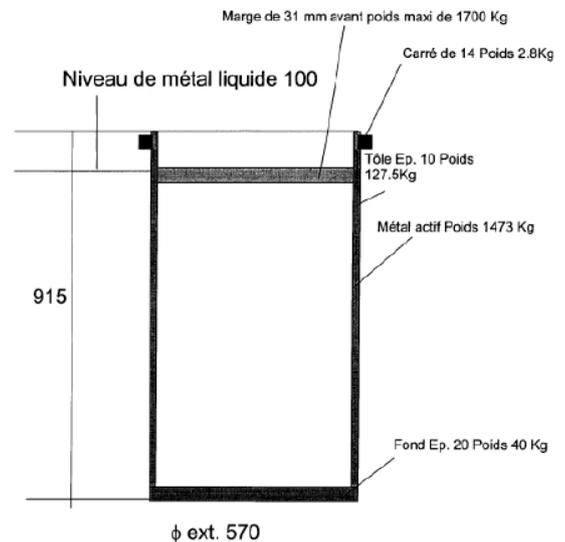
- Le risque explosion constitue un risque majeur pour un FI qui possède une bobine refroidie à l'eau autour du creuset (contact eau-métal liquide)
- Les pièces denses en quantité requièrent la présence de l'opérateur autour du four pour leur introduction progressive (four de petit diamètre où la descente de charge doit être assistée pour éviter le blocage et un choc risquant d'endommager le réfractaire du creuset).
- Au cours de la fusion, le FI nécessite un rechargement à plusieurs reprises pour intégrer la densité apparente des charges.

D. COULEE DES LINGOTS

Le métal liquide provenant du four de fusion est ensuite coulé en poche qui sera ensuite amené dans la zone de coulée pour solidification.

Il est prévu un conditionnement classique des lingots dans des fûts chemisés métal de 200 litres, pesant environ 1470 kg dont 1300 kg environ de métal fondu (voir schéma ci-contre).

Les fûts, référencés par producteur d'origine et identification de coulée, sont ensuite transférés dans des entreposages abrités en attente d'expédition vers le centre de stockage. Une cartographie radiologique sera réalisée et tracée avec la fiche d'identification des fûts.



Une prise d'échantillon pourra être faite en parallèle pour analyses.

E. MAINTENANCE ET EFFLUENTS

L'installation devra être capable de gérer la maintenance et les opérations de fusion – coulée dans un environnement en zone réglementée.

De plus, les activités classiques d'une aciérie seront à réaliser sur les installations techniques. Il s'agira notamment de la maintenance préventive et curative du système de contrôle commande du four et automates de coulée. Ainsi, tous les appareils de mesure devront être régulièrement étalonnés.

Les lingotières, poches, becs de coulée et autres réservoirs en contact avec le métal fondu devront être reconstitués périodiquement. Les réfractaires positionnés dans les lingotières devront être entretenus et remplacés si besoin après chaque opération de coulée. Les réfractaires usagés constitueront des déchets induits qui seront contrôlés et traités en déchets TFA.

De la même manière, après l'opération de décrassage, le laitier sera séparé du métal en fusion. Ce laitier constituera également des déchets induits qui seront contrôlés et traités en déchets TFA.

Enfin, l'installation va produire une quantité de poussières inhérentes à ce type d'activité qui seront collectées dans l'usine périodiquement. Les systèmes de ventilation seront équipés de

système de filtration et de séparations des gaz et des matières en suspension dans les fumées : ces poussières seront également collectées et conditionnées pour stockage TFA.

F. ENTREPOSAGE SORTIE USINE

Tous les lingots en fûts chemisés métal seront stockés dans une aire d'entreposage aval. Ces fûts seront regroupés et mis en containers de transport à destination du Cires pour stockage TFA.

De même, les autres déchets induits seront entreposés par type de conditionnement dans cette aire d'entreposage et seront regroupés dans des containers pour transfert vers le Cires. Cette aire pourra être située dans la même zone que l'aire d'entreposage amont.

6. COMPARAISON TECHNIQUE & QUALITATIVE DES FILIERES DE FUSION

La méthode utilisée pour cette analyse de la solution de fusion densifiante (décrite dans le chapitre précédent) consiste en un examen comparatif de 2 procédés qui s'appuient sur un processus et une technologie très analogues, à savoir :

1. La fusion à vocation de valorisation
2. La fusion densifiante à destination du stockage TFA

Les 2 méthodes de fusion seront ensuite comparées en relatif à la solution de stockage direct des substances sans mise en œuvre de fusion.

La première solution a fait l'objet du livrable article 24 de l'arrêté PNGMDR. La deuxième est décrite dans le présent document.

De façon schématique, les 2 processus s'appuient sur la même technologie et les mêmes activités de préparation puis de fusion dans un four électrique à Arc (Arc pour la fusion valorisation et Arc ou Induction pour la fusion densifiante).

La principale différence des deux filières de traitement porte sur la finalité des produits de fusion :

1. Dans le premier cas, les lingots issus de la fusion seront valorisés
2. Dans le deuxième cas, ces lingots seront stockés directement au Cires

L'analyse ci-jointe compare ces 2 solutions sur les grandes phases de traitement des matériaux métalliques :

- Le tri des équipements
- La décontamination
- Le procédé de fusion et affinage
- L'incidence de déchets induits
- La finalité des produits de fusion
- Une comparaison finale en volumes utiles à stocker en TFA

A. TRI DES EQUIPEMENTS

Avant dépose et démantèlement, les équipements encore en place dans l'installation nucléaire font l'objet d'une identification qui donne des informations utiles pour optimiser la gestion ultérieure des matériaux et favoriser les opérations de tri sélectif.

On peut citer les informations suivantes qui pourront éventuellement être récupérées de la documentation existante, présentant un intérêt quand la masse de produits identiques devient significative :

- Traçabilité au système élémentaire et sa localisation dans le circuit ;
- Nuance du matériau ;
- Situation radiologique : débit de dose général (à distance / au contact) + présence de point(s) chaud(s) ponctuel(s) ;
- Dimensions et masses hors tout.

Fusion avec valorisation

L'objectif d'avoir des lots de matières homogènes peut être traité à la source par **un tri sélectif** appuyé permettant :

- La gestion du bilan radiologique pour ségréger des lots à finalité TFA / lots à finalité FMA.
- D'isoler, identifier et ségréger les tronçons de tuyauteries ou les équipements avec points chauds.
- De faire des lots de charge matière avec la même nuance connue (en s'appuyant sur la documentation de réalisation quand disponible).
- De passer d'une configuration de charge « Vrac » vers une charge de matériaux plus homogènes.
- De faire un tri de produits de dimensions analogues afin de faciliter le traitement ultérieur, éviter ou faciliter la phase « usine de conditionnement ».

Fusion densifiante

La finalité étant le stockage, il convient de procéder à **un tri minimal** des équipements permettant :

- La gestion du bilan radiologique pour ségréger des lots à finalité TFA / lots à finalité FMA).
- Obliger à ségréger les matières et exclure des pièces impropres afin de garantir les conditions de sécurité des opérations dans le cas d'utilisation de four à induction
- Faire un tri minimal de produits de dimensions analogues afin de faciliter le traitement ultérieur et éviter ou faciliter la phase « usine de conditionnement ».

B. DECONTAMINATION AMONT

En configuration de démantèlement de l'installation nucléaire, il pourra être jugé nécessaire de procéder à une décontamination mécanique ou chimique d'une partie des circuits afin de réduire le niveau d'ambiance dans certains locaux et ainsi abaisser le bilan dosimétrique collectif des intervenants dans ces locaux. Ceci sera applicable dans nos 2 cas étudiés, indépendamment de la finalité des matières.

De plus, pour le cas d'équipements de grandes dimensions qui seront transportés en l'état vers l'usine de conditionnement, la décontamination radiologique pourra avoir un effet positif, par exemple pour le cas d'échangeurs avec un circuit en contact avec du fluide primaire.

Fusion avec valorisation

Pour améliorer l'homogénéité des charges, dans l'usine de conditionnement ou au plus tard dans l'usine de fusion, il pourrait être procédé à une décontamination des lots de ferraille afin d'abaisser le terme source et ainsi permettre que ce lot de matière puisse être traité dans des meilleures conditions réduisant la dosimétrie collective.

Cette décontamination pourrait être mécanique ou chimique. L'inconvénient est que cette activité génère des déchets induits.

Fusion densifiante

Pas de décontamination prévue (pour l'opération de fusion).

En cas de détection de point chaud dans l'usine de conditionnement (cas d'équipement de grande capacité et hétérogène en activité), on peut prévoir un adressage par tri complémentaire avec affectation sur lot TFA ou FMA si besoin.

C. PROCEDE DE FUSION ET AFFINAGE

Comme indiqué dans le chapitre précédent, la fusion densifiante a pour vocation de fondre les lots de ferrailles en métal liquide et couler ce métal en lingots. L'installation décrite dans ce chapitre ne considère que les actions nécessaires pour remplir ce besoin et ne prévoit pas de moyen complémentaire pour réaliser un affinage des lingots et obtenir une métallurgie secondaire permettant une mise à nuance.

Dans les 2 cas, des prélèvements de matière seront faits au cours de la fusion pour analyse radiologique.

Fusion avec valorisation

Du point de vue de la technologie de four, le four électrique à arc est plus adapté à cette finalité car permettant une meilleure décontamination des ferrailles.

L'objectif de la valorisation des matériaux métalliques est de pouvoir fournir en sortie Usine, des aciers ou des fontes mises à nuance définie et offrir une meilleure valeur ajoutée.

Cette installation plus sophistiquée implique un investissement plus important dans l'installation de fusion

Pour cela, l'installation de fusion doit disposer au-delà du four à Arc des moyens additionnels pour améliorer la qualité de la charge fondue de produits métalliques. Ainsi, des adjuvants peuvent être ajoutés pour affinage (poudre & gaz). Pour cela, une unité de décarburation sous vide et un four d'affinage pourraient être ajoutés éventuellement à l'installation pour améliorer la métallurgie secondaire selon la stratégie de mises à nuance pour valorisation.

Fusion densifiante

Du point de vue de la technologie de four, le four électrique à arc reste le plus adapté à cette finalité mais le four électrique à induction reste aussi compatible car cette solution ne prévoit pas d'affinage.

Pas d'opération d'affinage prévue pour améliorer les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des lingots.

Les seules opérations qui seront réalisées au titre de la métallurgie secondaire seront celles strictement nécessaires pour réaliser l'opération de fusion et de coulée du métal fondu dans les lingots dans des conditions de sécurité satisfaisantes. Ainsi la nécessité des opérations de décarburation et désoxydation (calmage Alu) sera évaluée par les spécialistes de l'aciérie en fonction de la qualité des ferrailles, à minima pour assurer la sécurité des intervenants.

D. INCIDENCE DES DECHETS INDUITS

Comme indiqué dans les thèmes précédents, les matériaux métalliques subiront des interventions dans le processus de fusion et affinage pour le cas de la fusion valorisation. De plus, le métal fondu sera vidangé depuis le four à Arc vers des poches et lingots et vers le four d'affinage (quand applicable) : tous ces récipients métalliques auront leurs parois protégées par des réfractaires et nécessiteront une maintenance régulière avec remplacement des parties endommagées.

Enfin l'installation produira des poussières au cours des différentes phases d'élaboration.

Les gaz seront filtrés et les poussières seront collectées.

Toutes ces activités conduisent à la création de déchets induits qui viendront s'ajouter à l'inventaire déchets des installations : après vérification de l'activité, ceux-ci partiront en stockage TFA.

Fusion Avec valorisation

De façon quantitative, cette installation va produire plus de déchet induit par tonne de ferraille.

Dans la suite de l'étude, la quantité induite est estimée entre 4% à 8% de la masse traitée. Seuls ces déchets seront stockés.

Fusion densifiante avec stockage

De façon quantitative, cette installation va produire moins de déchet induit par tonne de ferraille.

Dans la suite de l'étude, la quantité induite est estimée à 3% de la masse traitée. Cette quantité de déchets induits vient s'ajouter aux lingots considérés ici comme des déchets.

Les deux installations produiront de manière équivalente des déchets d'exploitations (tenues, déchets conventionnels...)

E. FINALITE DES PRODUITS DE FUSION

L'intérêt de la fusion densifiante est de fondre les ferrailles et gagner en volume utile par rapport à un compactage simple de déchets (qui peut être difficile à mettre en œuvre pour des matériaux métalliques de forte épaisseur).

Fusion avec valorisation

De façon évidente, la quantité de métal qui sera valorisée ne partira pas en stockage TFA et constitue un gain net de capacité.

Par contre, cette solution implique des adaptations réglementaires en vue de remettre dans le domaine conventionnel des lingots issus du traitement de matériaux métalliques provenant d'installations nucléaires (notamment via l'obtention d'une libération inconditionnelle en relation avec les articles 1333-2 à 4 du code de la santé publique).

Fusion densifiante

L'effet densifiant réduira le volume utile en stockage.

F. ANALYSE COMPARATIVE DES DIFFERENTES SOLUTIONS EN VOLUMES TFA STOCKES

Cette comparaison a pour vocation d'estimer les volumes stockés ou évités en centre de stockage de déchets TFA selon les différentes solutions envisagées.

Comme les matériaux métalliques TFA peuvent être très disparates et hétérogènes, il n'est pas aisé de définir des règles de transposition entre les masses globales de déchets, les volumes stockés en vrac après démantèlement des installations nucléaires ou après compactage, le tout par rapport à une fusion du métal.

Pour se faire, certaines hypothèses issues de l'étude article 24 sont utilisées à titre de comparaison.

Hypothèses & formules de transposition :

Les données suivantes s'appuient sur des observations statistiques (consensus des producteurs avec l'Andra) des formules de transposition Masse → Volume

- Masse équipement → volume stocké en vrac dans containers TFA sans fusion densifiante :

$$\text{Volume (m}^3\text{)} = \text{Masse (tonne)} / (\text{densité variable entre } 0,8 \text{ et } 1,2 \text{ t/m}^3\text{)}$$

- Masse équipement → volume stocké après fusion du métal et stockage dans des fûts métalliques TFA :

$$\text{Volume (m}^3\text{)} = \text{Masse (tonne)} / (\text{densité après coulée dans fût chemisé } 6,5 \text{ t/m}^3\text{)}$$

- Volume de déchets induits en TFA
 - *Nota 1 : ce volume est indépendant du ratio de matière valorisé / matière stockée).*
 - *Nota 2 : les déchets induits seront de diverses natures ayant chacune des valeurs de densité différentes (par ex, réfractaires $d= 1,5$, laitiers $d= 2$, poussières $d= 0,3$). Le calcul considère une valeur moyenne de densité $d=1$*

$$\text{Volume déchets induits (m}^3\text{)} = \text{Masse (tonne)} \times \text{taux de déchets induits \%} / (\text{densité moyenne des déchets définie à } 1)$$

- Taux fusion densifiante = 3%
- Taux valorisation = entre 4 & 8% selon les moyens mis en œuvre pour apurer les métaux

Sur la base de ces hypothèses, le schéma ci-dessous permet de comparer différentes configurations.

Pour cette comparaison, tous les calculs seront faits sur la **base d'une masse de 1000 tonnes** :

1. La solution stockage direct vrac sans fusion :

Il s'agit de conditionner dans les containers de stockage les équipements déposés de l'installation avec un rangement optimisé.

Nota : ceci sera en partie représentatif des volumes à transférer entre l'installation nucléaire et l'usine de fusion (ou vers l'usine de conditionnement / découpe)

- $\text{Volume Stockage} = 1000 / (1,2 \text{ min} - 0,8 \text{ max}) =$
 - $\text{Mini} = 833 \text{ m}^3$
 - $\text{Maxi} = 1250 \text{ m}^3$

2. La solution fusion densifiante :

Il s'agit de convertir la masse totale en volume équivalent intégrant le retrait de chauffe après coulée dans les fûts chemisés. Pour cela, on applique la formule intégrant la densité moyenne attendue sur ces fûts ($6,5 \text{ t} / \text{m}^3$).

En complément, pour la mise en œuvre du procédé, le volume de déchets induits (laitier, réfractaires, lingotière, poussières...) est estimé à 3% en masse.

- $\text{Volume de métaux en Fusion Densifiante} = 1000 / 6.5 = 154 \text{ m}^3$
- $\text{Volume déchets induits (ratio 3\%)} = 1000 \times 3\% / 1 = 30 \text{ m}^3$

3. Une valorisation de métaux:

Selon les gisements disponibles en TFA et la mise en œuvre de moyens techniques plus élaborés (notamment un four électrique à arc), on pourrait obtenir une valorisation de certains lots de matières (dépendant de leur nature intrinsèque)

Comme dans le cas des produits décrits dans le cadre de l'Article 24

- $\text{Volume Fusion Valorisante à 100\%} = 100\% \times \text{Volume Fusion densifiante} = + 154 \text{ m}^3 \text{ valorisé}$
- $\text{Volume déchets induits (ratio de 4 à 8 \%)} = 40 \text{ à } 80 \text{ m}^3$

Les figures 4 & 5 présentent la synthèse des comparaisons des volumes des différentes solutions étudiées :

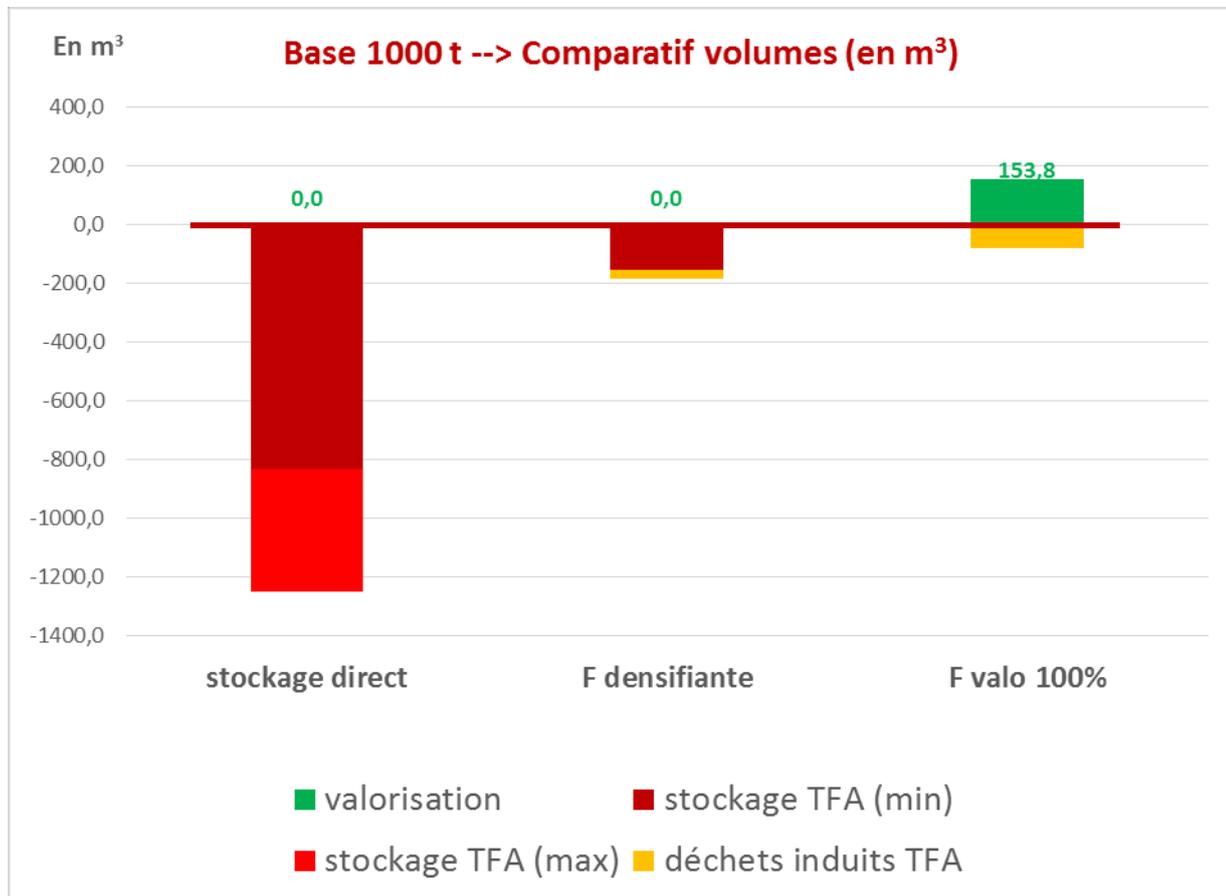


FIGURE 4 - Comparaisons de volumes entre le stockage direct en TFA et les solutions de fusion densifiante ou valorisation

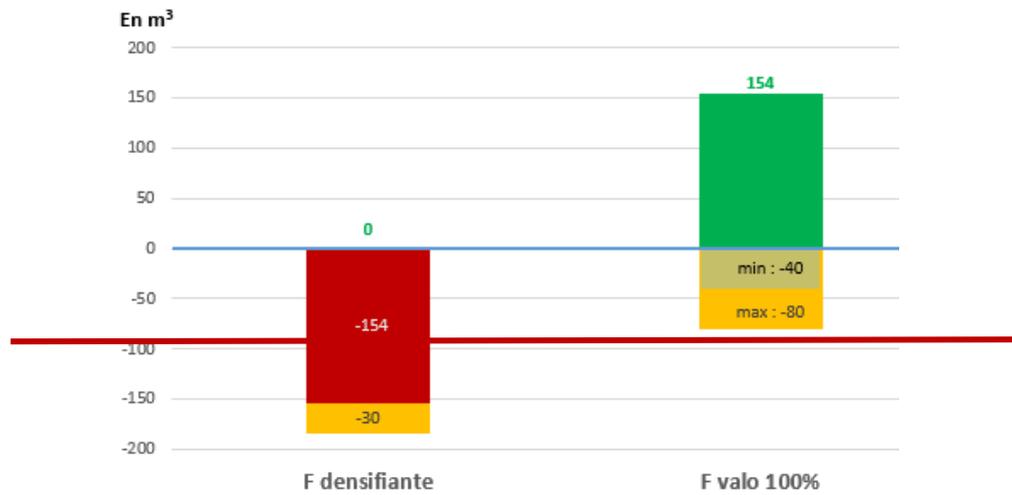


FIGURE 5 - Comparaison de volumes entre les solutions de fusion densifiante ou valorisation (ZOOM sur les filières avec fusion)

G. INFORMATION SUR ESTIMATION ECONOMIQUE

L'estimation du coût d'une installation de fusion (densifiante ou valorisation) reste dépendante notamment des choix technologiques d'équipements (au 1er rang, le type de four à arc ou induction), des choix de cadences de travail et de la capacité de traitement du four (en tonnes d'acier).

Le lieu défini de la localisation de l'installation pourra également influencer le coût d'amenée des éléments métalliques à traiter.

Pour des raisons de confidentialité, de propriété intellectuelle et de démarche concurrentielle, il n'est pas possible d'afficher dans ce document des coûts de revient de telles installations de densification ou de valorisation.

On peut néanmoins préciser que :

- Les coûts d'investissement et d'exploitation d'une installation uniquement dédiée à de la fusion densifiante ne seraient que légèrement inférieurs à ceux d'une installation plus complète de fusion valorisation.
- La conception de ces deux types d'installations en termes de sûreté, radioprotection et sécurité ainsi que l'ensemble des modules de préparation des charges, d'aciérie (coulée) et d'entreposage seraient communs.
- L'écart entre les deux installations en termes de CAPEX et d'OPEX résiderait dans une préparation des charges plus sélective en vue d'affiner la métallurgie secondaire pour mise à nuance uniquement dans une installation de valorisation en vue de maximiser la valorisation économique du produit final.
- Contrairement à une installation de valorisation, le produit de sortie d'une installation de fusion densifiante doit faire impérativement l'objet d'un stockage au Cires et ne fait donc l'objet d'aucune valorisation.
- Dans les deux cas les déchets induits font l'objet d'un stockage au Cires.

Ainsi, dans les conditions technico-économiques actuelles, il n'est pas envisageable qu'un investisseur s'engage sur la conception et la construction d'une installation seulement dédiée à la fusion densifiante, avec des objectifs de volume à traiter significatifs.

En revanche, la création d'une installation de fusion valorisation qui pourrait traiter des matériaux métalliques pendant des creux de charge reste une solution concevable.

7. ANALYSE DES CRITERES D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

L'installation décrite dans les chapitres précédents est présentée à un niveau d'étude de faisabilité, il est ainsi difficile de définir et quantifier les impacts des différents postes de travail de l'installation sur l'environnement.

Une présentation qualitative des facteurs ayant un impact est proposée par postes principaux de cette installation.

A. IMPACT PRINCIPAL SUR L'ENVIRONNEMENT

Comme précisé dans les chapitres précédents, l'intérêt technique principal est le gain en volume de déchets grâce à la densification.. Le ratio moyen de gain proposé (consensus entre les 3 producteurs et l'Andra) de 6.5 est significatif.

En reprenant les calculs présentés dans les chapitres précédents, on obtient pour une quantité de matériaux métalliques de 1000 tonnes une variation significative de 1250 m³ en stockage direct (cas d'une hypothèse maxi) à 183 m³ en fusion densifiante.

Les autres impact environnementaux proposés dans la suite de ce chapitre sont à mentionner mais constituent des paramètres de 2^{ème} ordre par rapport à l'enjeu stockage.

B. AUTRES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

a) Exploitation générale de l'installation

Des déchets secondaires seront générés pendant l'exploitation et la maintenance globale, tels que les tenues des opérateurs, les filtres de ventilation, les frottis de contrôle.

Cette installation aura également une consommation en fluides et énergie importante (voir § opérations de fusion infra) pour l'exploitation générale.

b) Transport & entreposages amont et aval

L'installation centralisée déportée dans un lieu unique va occasionner des nuisances liées aux opérations de transport depuis les installations nucléaires à démanteler. Pour la majorité des équipements, ceux-ci seront transportés par remorque automotrice, barge ou navire qui auront une empreinte carbone importante selon la distance et la complexité du transport intermodal.

En complément, sur le site, les opérations d'entreposage occasionneront également des opérations de brouettage avec une remorque automotrice ou par Fenwick, opérations avec un impact carbone également.

Enfin, un portique de spectrométrie d'entrée / sortie (refroidi à l'azote) de site sera implanté avec une consommation d'azote pour prévenir la dissémination de produits contaminés hors de l'installation.

c) Opérations de découpe / conditionnement

L'installation sera équipée de plusieurs moyens de découpe des équipements dont certains pourront être des composants mixtes avec gestion TFA & FMA.

Les moyens de découpe mécaniques (découpe orbitale, scie circulaire, scie à ruban, câble diamanté...) ou thermique (oxycoupage) généreront des déchets liquides ou des poussières qui seront gérés selon les filières conventionnelles ainsi que des effluents liquides radioactifs limités qui seront traités selon la filière adaptée aux fluides et selon leur activité. Ils occasionneront des consommations énergétiques : électriques pour les outils mécaniques et mélanges gazeux pour l'oxycoupage (acétylène / propane & oxygène).

Ces outils de découpe pourront aussi générer des nuisances telles que les vibrations et des niveaux de bruit significatifs en utilisation.

d) Postes d'assainissement & décontamination amont a la fusion

Dans le cas d'utilisation d'un procédé de décontamination chimique en amont de la découpe des équipements puis de leur fusion, des réactifs (différents acides selon la technique mise en œuvre) seront utilisés.

Ces produits généreront par conséquent la production de résines échangeuses d'ions, des déchets induits (filtres procédé et ventilation notamment) ainsi que des effluents gazeux et liquides radioactifs qui seront collectés.

e) Opérations de fusion

La mise en œuvre du four de fusion, avec la technologie de four à induction ou à arc sera la principale consommatrice électrique de l'installation. Sans préjuger de la capacité du four, on peut estimer la consommation autour de 1000 à 2000 MWh/ an.

En complément, comme évoqué dans le chapitre Incidence des déchets induits, cette opération générera des gaz et poussières qui seront collectés et traités par l'installation.

Les fours à induction génèrent quelques kg / tonne et les fours à arc une dizaine de kg / tonne.

Les fours à arc généreront du monoxyde de Carbone via l'utilisation des électrodes. Environ quelques dizaines de Nm³ / tonne traités.

En complément, l'installation générera une consommation de réfractaires pour protéger les surfaces en contact avec le métal fondu, qui serviront à remplacer les revêtements endommagés et seront traités en déchets induits TFA.

De même, le laitier prélevé en surface de la matière fondue sera séparé du métal et traité via la filière TFA.

f) Démantèlement des installations

Les opérations de déconstruction amèneront à la production de déchets conventionnels pour une partie significative, notamment de gros volumes de déchets gravats et béton ainsi que des déchets métalliques.

Certains circuits fluides ou ventilation verront le transit de fluides ou gaz activés, ce qui conduira à leur traitement par une filière de démantèlement nucléaire, dans celles qui seront adaptées à chaque type de produits. Une partie de ceux-ci pourront être soit traités via incinération, éventuellement recyclage via d'autres installations analogues à celle-ci ou partiront en stockage TFA (ou FMA) selon leur activité.

La prise en compte du démantèlement à la conception pour la définition du zonage déchets de l'installation permettra une optimisation des volumes de déchets générés lors du démantèlement (limitation des zones à déchets nucléaires et par conséquent des quantités de déchets nucléaires).

C. ANALYSE SELON LES CRITERES MTD (MEILLEURS TECHNIQUES DISPONIBLES) : FILIERES STOCKAGE DIRECT VERSUS FUSION DENSIFIANTE ET FUSION VALORISATION

			Stockage direct au Cires		Fusion densifiante		Fusion valorisation pour les déchets éligibles	
Type de critère	N°	Description du critère d'analyse	Notation	Commentaires / Justification du choix par rapport au critère	Notation	Commentaires / Justification du choix par rapport au critère	Notation	Commentaires / Justification du choix par rapport au critère
Technique	1	Déchets induits Utilisation de techniques produisant peu de déchets induits en exploitation	3	Le stockage produit peu de déchets induits en exploitation Faible quantité de déchets de maintenance, d'exploitation et de démantèlement	2	La fusion de déchets produit différents déchets induits (liquides et solides) gérés dans les filières nucléaires et conventionnelles correspondantes	2	La fusion de déchets produit différents déchets induits (liquides et solides) gérés dans les filières nucléaires et conventionnelles correspondantes
Environnemental	2	Utilisation de substances (moins) dangereuses	3	Peu de substances dangereuses utilisées	2	Utilisation de réactifs chimiques pour le traitement de fumée et la fusion	2	Utilisation de réactifs chimiques pour le traitement de fumée et la fusion
Environnemental	3	Récupération recyclage Economie en matière première réalisée	1	Cas le plus défavorable : stockage de matériaux, utilisation d'emballages et utilisation de grave et de béton	2	Economie de béton d'injection et de grave Utilisation de réactifs chimiques et emballages de stockage	3	Economie de matière première minéral, de béton d'injection et de grave Utilisation plus importante de réactifs chimiques et moins d'emballages de stockage
Technique	4	Procédés, équipements ou modes d'exploitation comparables, qui ont été expérimentés avec succès à une échelle industrielle	4	Mode de gestion éprouvé dans le domaine conventionnel et nucléaire pour la gestion des déchets ultimes	4	Procédé éprouvé dans le domaine conventionnel et nucléaire	4	Procédé éprouvé dans le domaine conventionnel et nucléaire
Technique	5	Progrès techniques et évolution des connaissances scientifiques	3	Stockage aux meilleurs standards	3	Procédé répondant aux MTD et validation par les études d'impacts	3	Procédé répondant aux MTD et validation par les études d'impacts
Environnemental	6a	Dans l'air (substances chimiques, COV...)	4	Quantités rejetées faibles	2	Rejets plus élevés, soumis à autorisations	2	Rejets plus élevés, soumis à autorisations
	6b	Dans l'eau, effluents de procédé	3	Quantités rejetées faibles	3	Quantités rejetées faibles	3	Quantités rejetées faibles
Technique	7	Date de mise en service des installations		Sans objet		Sans objet		Sans objet
Technique	8	durée nécessaire à la mise en place de la méthode		Sans objet		Sans objet		Sans objet
Environnemental	9a	Consommation d'énergie et rejets en CO2	3	Faible consommation d'énergie	1	Forte consommation d'énergie (dont transport)	1	Forte consommation d'énergie (dont transport)
	9c	Consommation de matière première minérale pour la construction de l'installation	3	Faible, installation existante et infrastructures limités pour le futur centre TFA	2	Utilisation plus importante, notamment en métaux	2	Utilisation plus importante, notamment en métaux
	9c	Consommation d'eau	3	Faible consommation d'eau	2	Consommation importante d'eau pour traitement des rejets gazeux (traitement humide)	2	Consommation importante d'eau pour traitement des rejets gazeux (traitement humide)
Sanitaire	10a	Nécessité de prévenir ou de réduire à un minimum l'impact en exploitation Basée sur la radioprotection des travailleurs	2	Dosimétrie minimale	2	Moins de dosimétrie en préparation et conditionnement des lots de déchets mais plus en traitement du déchet (multiplication des opérations)	2	Moins de dosimétrie en préparation et conditionnement des lots de déchets mais plus en traitement du déchet (multiplication des opérations)
	10b	Bruits et nuisances	2		2		2	
	10c	Impact long terme des déchets	2	Déchets radioactifs et chimiques Impacts limité validé par étude d'impact	2	Densification sans modification de la concentration de la radioactivité et chimiques Impacts limité validé par étude d'impact	3	Réduction de la quantité de métaux stockés mais concentration de la radioactivité dans certains déchets issus de la valorisation (laitiers, poussières)
Sécurité	11	Nécessité de prévenir les accidents et d'en réduire les conséquences sur l'environnement	3	Taux de Fréquence (TF) et Taux de Gravité (TG) faibles Nombre d'opérations limité	2	Activité plus accidentogène : TF et TG faibles mais multiplication des opérations (dont tri préalable) et donc des risques d'incident et transport routier supplémentaire des déchets	2	Activité plus accidentogène : TF et TG faibles mais multiplication des opérations (dont tri préalable) et donc des risques d'incident et transport routier supplémentaire des déchets et de la matière
Environnemental	12a	Impact sur les sols et la biodiversité	2		3		4	
	12b	Impact du procédé sur l'exutoire : disponibilité et préservation de la capacité de stockage	2	Faible optimisation (compactage)	3	Importante réduction de volume	4	Importante réduction du volume et valorisation

Légende	
1	plutôt défavorable
2	Neutre ou moins favorable
3	légèrement favorable
4	Très favorable

FIGURE 6- Déclinaison du guide inter exploitant sur l'application des MTD à la gestion des déchets version de juin 2013

PMGMDR Article 28 - étude de faisabilité technico-économique de la fusion de déchets métalliques TFA en vue de leur densification

8. CONCLUSION

La mise en œuvre d'un procédé de fusion permet, par rapport à une solution de stockage direct, des gains de volume stockés d'un facteur 6 environ via la fusion densifiante et d'un facteur 20 environ via la fusion - valorisation pour recyclage.

Les trois solutions de gestion des déchets (stockage direct, fusion densifiante, fusion-valorisation) sont étudiées selon les critères techniques, sanitaires, sécurité et environnementaux.

Cette analyse met en particulier en avant l'intérêt de la fusion-valorisation d'un point de vue économie de stockage et économie de matière première.

Les aspects économiques sont également regardés. Cependant, en dehors du stockage direct, ces éléments sont très sensibles au dimensionnement des installations, aux gisements et aux chroniques des éléments métalliques à traiter.

La quasi-similitude des coûts des installations de valorisation et de densification en termes d'investissement (CAPEX) et d'exploitation (OPEX) rend la filière de densification très peu intéressante économiquement. En effet, dans le cas d'une installation de densification, hormis le gain de volume sur les déchets TFA qui n'est que d'un facteur 6 environ par rapport au stockage direct, le produit de sortie devra supporter le coût de stockage du Cires. Au contraire dans le cas d'une installation de valorisation, le gain de volume est d'un facteur 20 et le produit de sortie valorisable fait l'objet d'une revente pouvant représenter de 25 à 30% du coût du traitement du métal TFA. Ainsi, le stockage des lingots (cas de la fusion densifiante) constitue donc un surcoût alors que la valorisation représente un gain (cas de la fusion-valorisation).

Au regard des gisements d'éléments métalliques TFA croissants à venir dans les prochaines années et dans un objectif de préservation des capacités de stockage, il semble approprié :

- De valoriser les éléments métalliques TFA valorisables.
- De concevoir éventuellement la densification comme une voie de secours de la valorisation.
- De réserver le stockage au Cires aux déchets qui ne peuvent pas faire l'objet d'une valorisation.