

Analyse du projet de technocentre EDF (installation de valorisation de métaux très faiblement radioactifs) à Fessenheim (Haut-Rhin) : intérêt et incertitudes industrielles et scientifiques

Pr. Thierry de Laroche Lambert
Agrégé Physique et Chimie, Docteur Energétique
Chercheur associé à l'Institut FEMTO-ST – Dpt Energie
CNRS UMR 6174 – F-90000 Belfort
thierry.laroche Lambert@femto-st.fr

Introduction

Le projet de technocentre EDF à Fessenheim fait suite à la possibilité récemment ouverte par le 5^{ème} PNGMDR¹ de valoriser les déchets dits « très faiblement radioactifs » (**TFA**) provenant principalement du démantèlement d'installations nucléaires (réacteurs, usines d'enrichissement de l'uranium) dans des conditions de sécurité suffisantes en-dessous d'un seuil défini de libération et de réutilisation dans l'industrie sous forme de lingots d'acier, eux-mêmes très faiblement radioactifs. Cette libération des déchets TFA par recyclage dans des filières commerciales « conventionnelles », déjà pratiquée par d'autres pays nucléarisés, est autorisée par la directive Euratom 2013/59 avec un seuil d'activité radiologique massique fixé par élément radioactif encore présent dans les déchets sortants.

Ce projet est censé répondre à plusieurs problèmes liés au stockage des déchets TFA et apporter des gains économiques et environnementaux par rapport à d'autres solutions :

- forte réduction du volume des déchets TFA
- forte réduction des besoins en surface de stockage des déchets TFA sur le site du CIRE²
- possible meilleure analyse de cycle de vie par rapport au stockage sur le site du CIRE
- possible intérêt économique par revente des lingots

Cependant, le projet doit être analysé et évalué objectivement dans son ensemble, y compris dans ses objectifs de décontamination des métaux TFA en vue de leur réutilisation, en prenant également en compte toutes les alternatives possibles au technocentre lui-même, ainsi que les aspects physico-chimiques en jeu dans les techniques de fusion oxydante de métaux contaminés par radionucléides.

Cette contribution tente de répondre à cet objectif à partir des documents officiels mis à disposition du public sur le site du Débat Public sur le technocentre, des différents cahiers d'acteurs des parties prenantes (en particulier Andra, CEA, Orano, Académie des technologies, SFEN, ENSMN, GSIEN, Global Chance, FNE, Stop Fessenheim, etc.) et contributions versées sur ce même site, ainsi que des études et articles scientifiques internationaux publiés dans les revues à comité de lecture ou dans les conférences internationales portant sur les méthodes et les résultats des expériences de fusion des métaux contaminés dans le monde.

¹ Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs

² Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage, géré par l'Agence Nationale des Déchets Radioactifs dans le département de l'Aube

1. Objectif de réduction du volume des déchets radioactifs TFA

La principale justification avancée par le **projet de technocentre Fessenheim (PTF)** est la réduction considérable indéniable du volume de déchets métalliques TFA qu'il apporterait en comparaison à l'entreposage actuel et futur sur les sites du CIREs.

Le PTF envisage de collecter pendant la durée prévue de son fonctionnement (environ jusqu'à 2055) quelque 492000 t de déchets métalliques TFA (214000 t provenant du démantèlement progressif du parc nucléaire EDF, 195000 t de celui de l'usine d'enrichissement d'uranium par diffusion gazeuse Georges Besse près de Tricastin, 83000 t d'installations nucléaires du CEA). Environ 441000 t (~ 90 %, 85 % selon EDF) de lingots métalliques potentiellement commercialisables en sortiraient. L'hypothèse d'ouvrir l'activité du technocentre aux déchets nucléaires TFA provenant d'autres pays européens est évoquée, cependant sans réelle étude de marché.

La production de ces 441000 t de lingots (d'acier ou de fonte selon le taux de carbone, proportion actuellement non clairement précisée dans le dossier) générerait nécessairement 10 à 15 % en masse de **déchets radioactifs faiblement à moyennement actifs (FMA)** issus des laitiers récupérés, des parties primaires des GV et des filtres sur les gaz et poussières émis, soit environ 51000 t de déchets FMA (25000 t évoqués dans le dossier EDF) devant être conditionnés et envoyés aux sites de stockage de l'Andra dans l'Aube.

La transformation en lingots de ces masses de métaux TFA par fusion permettrait une **réduction de leur volume total** d'environ 450000 m³, essentiellement grâce aux opérations de découpage-fusion des parties secondaires des quelque 350 générateurs de vapeur (GV) des 18 centrales nucléaires EDF. Cette réduction de volume de déchets TFA représente 69 % de la capacité actuelle du CIREs (650000 m³) ; cependant, l'Andra a déposé un projet d'extension de la capacité de stockage du CIREs à 950000 m³, prévue pour 15 années supplémentaires d'entreposage (sans technocentre).

- La question peut donc se poser de la *temporalité de la création du technocentre EDF vis-à-vis de l'extension du CIREs*, des coûts comparatifs des deux projets qui peuvent s'exclure partiellement ou totalement, du *lieu d'implantation du technocentre* (sur le site du CIREs comme *alternative* au site de Fessenheim) au regard de l'impact climatique et énergétique des transports des déchets métalliques TFA à réduire et des déchets FMA produits.
- On peut par exemple considérer comme absolument prioritaire de réduire le volume des déchets métalliques TFA, au prix d'un **coût énergétique et climatique** à comparer à celui du stockage de ces déchets non fondus en lingots, d'un **risque de dispersion de radioactivité** lors des opérations de conditionnement, séparation, fusion des métaux entrants et de conditionnement, transport des déchets FMA sortants ; d'une consommation d'eau (non précisée dans le dossier) par le technocentre jusqu'en 2055.
- On peut aussi considérer que le département de l'Aube n'a pas à supporter à lui seul la charge du stockage de tous les déchets radioactifs TFA et FMA de toute la France, et que chacun des 18 sites nucléaires EDF actuels peut prendre en charge le stockage des déchets FMA et TFA de son démantèlement, après évacuation des barres de combustibles et nettoyage des circuits secondaires et primaires, sans recourir à la création d'un technocentre centralisant tous les métaux TFA-FMA pour les découper, séparer et en transformer 85 à 90 % en lingots métalliques commercialisables. Dans cette solution alternative, les GV et les éléments du circuit secondaire seraient simplement entreposés et surveillés dans les bâtiments réacteurs utilisés comme sarcophages et mémoire de l'histoire des sites nucléaires pendant les décennies nécessaire à la décroissance de la radioactivité des déchets TFA-FMA avant d'envisager leur réutilisation possible, ce qui économiserait la majeure partie du coût de démantèlement des centrales nucléaires, des émissions de radionucléides (en particulier ceux issus des bétons de démolition des bâtiments réacteurs) et de la gestion des sites de stockage de déchets TFA et FMA dans l'aube.

Il convient donc d'examiner plus précisément les bénéfices et inconvénients économiques, énergétiques et écologiques, ainsi que l'efficacité-même du PTF en vue de la réutilisation des lingots produits, avant d'autoriser ou non la création du technocentre et son emplacement, de manière à pouvoir décider en toute transparence et conscience par un choix éclairé et démocratique.

2. Utilité énergétique, écologique et économique du projet

Dans l'analyse du cycle de vie du PTF, doivent être intégrés les impacts de la construction du technocentre, de son fonctionnement (transport des matériaux et des personnes, consommations d'électricité, de gaz naturel, de propane, d'eau, production et traitement de déchets et d'effluents), de son démantèlement. Les études en cours sont encore partielles et doivent être étendues et complétées pour permettre une comparaison la plus pertinente possible avec les autres alternatives (technocentre au CIREs, poursuite de l'entreposage au CIREs sans technocentre, stockage des métaux TFA-FMA de démantèlement sélectif dans chaque bâtiment réacteur des centrales nucléaires déclassées, production d'aciers recyclés extérieurs par four électrique).

2.1. Consommations

Les consommations moyennes annuelles prévues d'électricité (60 GWh), de gaz naturel (1250 t, soit 19 GWh), de propane (500 kg, soit 6,9 GWh) sont à comparer aux consommations annuelles locales (environ 1,2 % de la consommation d'électricité de tout le département du Haut-Rhin ; 7,5 % de la production moyenne de l'usine hydroélectrique de Fessenheim) et mise en regard des objectifs d'électrification indispensables des moyens de transport routier (environ 2 % de la consommation prévue des trains, trams, bus, véhicules individuels, véhicules utilitaires, camionnettes, camions, barges à l'horizon 2050). A ces consommations de fonctionnement, doivent s'ajouter toutes les consommations pendant la durée de construction puis de démantèlement du technocentre envisagé.

Par conséquent, au vu des besoins en électricité prévus par la transition énergétique locale et nationale, en particulier pour l'électrification des transports et des procédés industriels existants, il est indispensable de prendre en considération la priorité d'usage des productions électriques sur le territoire local et national dans ces directions pour juger de l'utilité ou non d'ajouter les consommations d'énergie électrique et fossiles supplémentaires générées par le PTF.

En comparaison, la *consommation électrique par tonne d'acier recyclé produit* par le procédé de fusion électrique du technocentre projeté s'avère environ **2,6 fois plus élevée** que celle d'une aciérie à four électrique, ce qui interroge le modèle économique et énergétique du technocentre, sans parler des aspects radiologiques liés à l'acier qu'il produirait. A cet égard, la comparaison avec la production d'acier à partir des mines de fer, soulignée dans les documents EDF, n'est pas pertinente pour évaluer les performances énergétiques du projet de technocentre.

D'autre part, les besoins en eau pour la création, le fonctionnement et le démantèlement du technocentre projeté par EDF sont probablement importants mais ne sont pas évalués dans les documents du projet. De même, la production d'effluents liquides radioactifs à l'issue des opérations de nettoyage est évoquée, sans être quantifiée.

Le caractère soutenable, plusieurs fois souligné dans les documents EDF du projet de technocentre, est par conséquent difficile à affirmer et à justifier, et semble plutôt relever de l'affichage commercial que de la démonstration rigoureuse.

2.2. Aspects économiques

Pour être intégré dans un plan de financement et d'évaluation du prix de revient de la tonne de lingots produits, le coût d'investissement annoncé pour la création du technocentre, évalué à 450 millions d'euros (M€₂₀₂₃), devrait être réparti sur la durée de son fonctionnement en incluant les intérêts

bancaires intercalaires ainsi que l'ensemble des frais d'opération et de main d'œuvre, les frais d'assurance et les coûts prévisionnels de démantèlement. Le financement de l'ensemble, supposé porté par EDF à travers une filiale dédiée, n'est pas clairement établi dans les documents mis à disposition, ce qui rend difficile toute évaluation économique globale du projet.

Cependant, la forte consommation d'énergie (et probablement d'eau) par tonne d'acier recyclé par rapport à la production actuelle d'acier recyclé par four électrique dans les aciéries modernes entame sérieusement *a priori* la validation économique du projet de technocentre, en l'absence de modèle économique avéré et consolidé (en particulier du côté clients).

3. Incertitudes techniques et scientifiques

La revue des publications scientifiques internationales sur l'évaluation de l'efficacité de la fusion des déchets radioactifs métalliques TFA et/ou FMA à séparer les éléments radioactifs des aciers fondus, ainsi que les rapports expérimentaux sur les différentes technologies de séparation des radioéléments par fusion des déchets métalliques radioactifs contredit en grande partie les affirmations avancées tant par EDF dans les documents présentés que, de manière plus surprenante, par le CEA, la SFEN et l'Académie des technologies dans leurs cahiers d'acteurs.

D'un point de vue purement physique, ***il est impossible de séparer par fusion oxydante les isotopes radioactifs des isotopes non radioactifs d'un même élément chimique métallique*** car le caractère oxydo-réducteur des atomes métalliques ne dépend pas du noyau atomique.

La seule propriété chimique qui intervient dans la possibilité de séparation de certains éléments chimiques métalliques par rapport à d'autres est leur ***enthalpie libre d'oxydo-réduction thermodynamique dans la formation d'oxyde métallique au contact de l'oxygène de l'air*** (brassé ou non dans le bain de fusion). On compare ainsi la propension d'un métal à réduire les oxydes d'un autre métal du bain en comparant leurs courbes d'enthalpie libre de réaction en fonction de la température dans un diagramme d'Ellingham³.

Par exemple, la courbe d'oxydo-réduction du cobalt à l'oxygène étant très au-dessus de celle du fer dans le diagramme d'Ellingham, il est thermodynamiquement impossible pour le cobalt de réduire les oxydes de fer pour s'oxyder lui-même à l'état d'oxyde de cobalt plus léger, qui pourrait alors flotter au-dessus du bain en s'agglomérant à la phase solide surnageante appelée « laitier ». Il en est de même du nickel, du zinc, du césium, de l'argent (radioactifs ou non). C'est en revanche possible avec l'uranium qui s'oxyde facilement en UO₂, sa courbe d'Ellingham étant très en dessous de celle du fer. L'ajout de composés chimiques (CaO, CaF₂, Al₂O₃, MgO, SiO₂, etc.) peut améliorer l'oxydation de certains éléments métalliques.

Il en résulte que ***le taux de récupération de nombreux isotopes radioactifs dans le laitier est très faible pour certains éléments métalliques***, ce qui rend le procédé de décontamination des aciers TFA et FMA peu efficaces pour ces éléments, comme le montrent les retours d'expérience des installations Carla de Siempelkamp à Krefeld en Allemagne⁴. On obtient par exemple : 0 à 11 % pour le cobalt 60 (période radioactive $T_{1/2} = 5,3$ ans), 0 à 5 % pour le césium 137 ($T_{1/2} = 30$ ans) ; 0 à 1 % pour le fer 55 ($T_{1/2} = 2,7$

³ J. Björkvall, G. Ye, M. Lindberg (2014). *Technical possibilities to support separation of radioactive elements from metallic waste*. Symposium on Recycling of Metals arising from Operation and Decommissioning of Nuclear Facilities – Studsvik in Nyköping, Sweden, 8-10 April 2014. https://www.oecd-nea.org/rwm/wpdd/studsvik2014/documents/C-1_technical_possibilities_G-Ye_000.pdf

⁴ U. Quade, W. Müller (2005). *Recycling of radioactively contaminated scrap from the nuclear cycle and spin-off for other application*. Rev. Metal Madrid Vol Extr, 23-28. <https://revistademetalurgia.revis-tas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/download/980/1005>

ans) ; 10 % pour le nickel 63 ($T_{1/2} = 100$ ans) ; 12 % pour le zinc 65 ($T_{1/2} = 244$ j) ; 4 % pour l'antimoine 125 ($T_{1/2} = 2,7$ ans). Par contre, ce taux de récupération est de 95 à 100% pour le strontium 90 ($T_{1/2} = 28,7$ ans), et de près de 99 % pour l'uranium 235 et 238, le plutonium 241, l'américium 241, etc., du fait même de ces propriétés d'oxydo-réduction évoquées plus haut. Cela concerne surtout les diffuseurs de l'usine d'enrichissement d'uranium. Les expérimentations en laboratoire menées par des chercheurs sud-coréens montrent par exemple que la répartition du cobalt entre le bain métallique fondu et le laitier varie à la fois dans le temps, dans l'épaisseur du bain et en fonction des additifs de fusion^{5,6}.

Ces taux de récupération doivent être mis en regard des proportions (en % d'atomes) et des activités radiologiques (en Bq/g) de ces radionucléides dans les déchets métalliques TFA entrants. De même, les **taux d'échappement des radionucléides dans les effluents gazeux** peuvent être très élevés selon les éléments chimiques et impactent fortement les **risques de contamination radioactive des populations et de la nature environnante** l'installation de récupération des déchets TFA et FMA, comme le montrent les évaluations menées par des chercheurs slovaques⁷, qui préconisent des études de sûreté, de faisabilité et des calculs de coûts-bénéfices détaillés pour prouver la sécurité, l'opérabilité et l'efficacité des scénarios de recyclage⁸.

D'autre part, le taux de contamination par radio-élément peut varier considérablement selon l'**origine des métaux TFA-FMA entrant dans les installations** de recyclage par fusion électrique, comme le montre l'étude précédente des chercheurs slovaques (ref. 7), ce qui peut impacter le taux de séparation des radionucléides mais aussi les doses reçues par les opérateurs lors des phases de tri, de fusion et de récupération du laitier. Cela pose aussi la question des **seuils d'acceptation de certains déchets radioactifs** au sein de ces installations (comme c'est le cas dans les installations Cyclife en Suède) et donc du technocentre projeté, qui impactent les doses de radioactivité reçues en amont lors du tri, mais aussi la **durée de stockage des lingots** pour garantir la décroissance des radionucléides restant à l'intérieur de ceux-ci (jusqu'à 30 ans envisagé en Corée du Sud) avant libération et recyclage dans les circuits des aciéries.

Le statut-même d'**ICPE** (Installation Classée pour la protection de l'Environnement) demandé pour le technocentre projeté par EDF est potentiellement en contradiction précisément avec la nature des déchets FMA entrants et par les reconcentrations possibles de certains radionucléides dans les déchets FMA secondaires générés par l'installation. Un statut d'**INB** (Installation Nucléaire de Base), plus exigeant, serait *a priori* préférable pour garantir la sûreté des installations, la sécurité des personnels censé œuvrer entre les déchets TFA-FMA entrants et sortants, et contrôler les méthodes de mesure des concentrations radioactives élément par élément, isotope par isotope dès la réception des colis et pendant toute la chaîne de découpe, tri, fusion, extraction des lingots et des laitiers, traitement des effluents, conditionnement des filtres et déchets radioactifs, etc. En effet, la majorité de la radioactivité initiale des déchets entrants se trouve encore présente dans les lingots, comme les études citées plus haut le confirment, ce qui nécessite une protection adaptée des personnels aux rayonnements gamma (irradiation extérieure) mais aussi alpha et bêta (contaminations externe et interne possibles

⁵ J-H. Lee (2020). *Induction Melting of Radioactive Stainless Steel Waste for Decommissioning of NPPs*. Transactions of the Korean Nuclear Society Virtual Spring Meeting, July 9-10, 2020. https://www.kns.org/files/pre_paper/43/20S-194-%EC%9D%B4%EC%A7%80%ED%9B%88.pdf

⁶ B.-Y. Min, W-K. Choi, W-Z. Oh, C-H. Jung, K-W. Lee (2009). *Partition characteristics of radionuclides during a melt decontamination of a contaminated metal waste*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 15 , 31–35. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2008.08.015>

⁷ A. Slimák, V. Nečas (2016). *Melting of contaminated metallic materials in the process of the decommissioning of nuclear power plants*. Progress in Nuclear Energy 92, 29-39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.06.008>

⁸ T. Hrnčir, R. Strazovec, M. Zachar (2019). *Potential for recycling of slightly radioactive metals arising from decommissioning within nuclear sector in Slovakia*. Journal of Environmental Radioactivity 196, 212-224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.08.011>

à la découpe, au tri, à la séparation du laitier, etc.). La DRIRE risque de ne pas avoir les compétences nécessaires pour pouvoir assurer ces garanties et l'autorité nécessaire. En effet, comme le souligne l'IRSN⁹, « *la déclinaison du concept de libération se heurte toutefois à une difficulté : l'absence d'impact ne peut être considérée comme établie qu'à condition de pouvoir s'assurer que les concentrations d'activité de l'ensemble des matériaux libérés respectent bien les seuils retenus. L'enjeu majeur de la libération de matériaux radioactifs concerne ainsi la maîtrise des procédures de contrôles préalables à la libération, notamment des étapes de caractérisation radiologique des matériaux destinés à être libérés. La métrologie doit être pour cela adaptée aux très faibles niveaux à mesurer, aux volumes potentiellement importants à caractériser mais aussi à la distribution éventuellement hétérogène de la radioactivité au sein de ces volumes. Dans ce contexte, le choix des techniques de mesure, la stratégie d'échantillonnage, la définition du niveau d'incertitude 'tolérable' ainsi que la rigueur des procédures d'assurance qualité sont des conditions primordiales pour garantir, en pratique, l'absence d'impact sanitaire* ». On ne saurait mieux dire.

Enfin, les méthodes de mesure avancée de détection des radionucléides dans la masse des lingots par spectrométrie gamma ne sont pas encore suffisamment rapides et sélectives pour identifier et déterminer correctement et rapidement la répartition des concentrations volumiques de chaque radionucléide, particulièrement en contrôle continu sur la chaîne de production, ce qui laisse un doute sur le contrôle des seuils de libération des aciers potentiellement produits par le technocentre tel qu'il est actuellement prévu par EDF.

4. Conclusions

Au vu des incertitudes nombreuses sur l'efficacité du procédé lui-même de décontamination par fusion des déchets radioactifs TFA-FMA dans le projet de technocentre EDF ; sur les contrôles de radioactivité par radionucléide tout au long des opérations ; sur l'équation économique à peine ébauchée dans les documents ; sur le caractère réellement soutenable du projet ; sur l'adéquation énergétique du projet avec les besoins urgents en électrification des transports et des procédés industriels actuels ; sur le choix du statut administratif retenu d'ICPE plutôt que d'INB ; sur l'intérêt-même du projet par rapport à d'autres solutions comme le stockage *in situ* des déchets de démantèlement sélectif TFA-FMA dans les bâtiments réacteurs ou l'installation du technocentre au CIREN plutôt qu'à Fessenheim, il apparaît que le projet de technocentre EDF à Fessenheim ne présente pas réellement et de manière indubitable les vertus techniques, économiques et écologiques qu'il avance.

La sagesse voudrait que ce projet soit réexaminé de manière plus approfondie, plus complète et plus transparente, et comparé avec la plus grande objectivité et indépendance aux alternatives évoquées dans cette contribution, voire à d'autres qui pourraient voir le jour pour apporter une solution réellement fiable, sûre, utile économiquement et soutenable écologiquement au problème de stockage des déchets métalliques (mais aussi non métalliques) TFA et FMA.

⁹ IRSN. PNGMDR – fiche d'analyse des controverses techniques – 5. Gestion des déchets de très faible activité. 22 octobre 2018. https://pngmdr.debatpublic.fr/images/contenu/documentation/clarification-controverses/Q5_IRSN.pdf