Analyse critique du projet de technocentre EDF (installation de valorisation de métaux très faiblement radioactifs) à Fessenheim (Haut-Rhin) : faisabilité technique, risques radiologiques, incertitudes scientifiques, écologiques et économiques

Critical analysis of the EDF technocenter project (facility for recycling very low-level radioactive metals) in Fessenheim (Haut-Rhin, France): technical feasibility, radiological risks, and scientific, ecological, and economic uncertainties.

Thierry de LAROCHELAMBERT

Chercheur associé à l'Institut FEMTO-ST (UMR 6174 CNRS – Université Marie et Louis Pasteur), Département Énergie
thierry.larochelambert@femto-st.fr

Résumé – Le projet de technocentre EDF, sur le site de la centrale nucléaire de Fessenheim (Haut-Rhin, France), fermée depuis 2020 et en cours de processus de démantèlement, est présenté officiellement par EDF comme destiné « à valoriser des métaux très faiblement radioactifs issus d'installations nucléaires, en vue de les recycler dans le domaine conventionnel » dans le cadre plus général d'une évolution de la réglementation française permettant « d'économiser des ressources naturelles ainsi que des capacités de stockage de déchets radioactifs, dans une logique d'économie circulaire ».

La présente étude se propose d'examiner la réalité de cet objectif et de ces arguments par une analyse scientifique, technique, environnementale et économique des documents du Dossier de Maître d'Ouvrage[1] (DMO) présentés par EDF lors du débat organisé par la Commission Nationale du Débat Public (CNDP Projet technocentre à Fessenheim, 10 octobre 2024 – 7 février 2025), à la lumière des connaissances scientifiques rapportées dans les études et articles de recherche internationaux, des retours d'expérience accumulés dans ce domaine, et du contexte économique et énergétique français et européen.

Les contraintes imposées par la radioprotection et le contrôle de la radioactivité lors des multiples manipulations dans les procédés de séparation, découpe, fusion, conditionnement des matériaux radioactifs entrants et sortants des installations nucléaires du technocentre EDF projeté, sont sujettes à de nombreuses incertitudes techniques et scientifiques, mais aussi écologiques et économiques, qui questionnent la pertinence et l'intérêt de ce projet pour la gestion des déchets radioactifs de *faible à moyenne activité* (FMA) et *très faible activité* (TFA), jusqu'au statut juridique-même d'Installation Classée pour la Protection de l'Environnement (ICPE) prévu pour le technocentre plutôt que celui d'Installation Nucléaire de Base (INB).

Les avantages et inconvénients du projet de technocentre EDF à Fessenheim peuvent alors être comparés avec ceux d'autres stratégies possibles, également présentées et discutées dans cet article, pour une gestion raisonnée et prudente des matériaux radioactifs FMA et TFA issus du démantèlement des centrales nucléaires et de l'usine d'enrichissement de l'uranium Georges Besse 1 Eurodif de Pierrelatte, susceptibles d'être traités dans le technocentre EDF à Fessenheim.

Mots-clés : déchets radioactifs ; industrie nucléaire ; radioactivité ; FMA ; TFA ; recyclage ; fusion ; four électrique ; contrôle ; seuil de libération.

Abstract *– The EDF technocenter project, located at the Fessenheim nuclear power plant site (Haut-Rhin, France), which has been closed since 2020 and is currently being dismantled, is officially presented by EDF as intended "to recover very low-level radioactive metals from nuclear facilities for recycling in the conventional sector," within the broader context of changes to French regulations aimed at "saving natural resources and radioactive waste storage capacity, in line with the circular economy approach."*

[1] https://www.debatpublic.fr/sites/default/files/2024-09/EDF-Projet-Technocentre-Fessenheim-DMO.pdf.

This study aims to examine the reality of this objective and these arguments through a scientific, technical, environmental and economic analysis of the project owner's documents presented by EDF during the debate organised by the National Commission for Public Debate (CNDP Technocenter Project in Fessenheim, 10 October 2024 – 7 February 2025), in light of the scientific knowledge reported in international studies and research articles, the feedback accumulated in this field, and the French and European economic and energy context.

The numerous handling operations involved in the separation, cutting, melting and packaging of radioactive materials entering and leaving the nuclear facilities of the proposed EDF technocenter are subject to technical, scientific, ecological and economic uncertainties imposed by radiation protection and radioactivity monitoring. These uncertainties call into question the relevance and value of this project for managing low-and intermediate-level and very low-level radioactive waste ('LILW', 'VLLW'), as well as the legal status of Classified Facility for Environmental Protection (ICPE in French) envisaged for the technocenter instead of Basic Nuclear Facility (INB in French).

The advantages and disadvantages of the EDF technocenter project in Fessenheim can then be compared with those of other possible strategies, also presented and discussed in this article, for the rational and safe management of LILW and VLLW radioactive materials resulting from the decommissioning of nuclear power plants and the Georges Besse 1 Eurodif uranium enrichment plant in Pierrelatte, which are likely to be processed at the EDF technocenter in Fessenheim.

Keywords: *radioactive waste; nuclear industry; radioactivity; LILW; VLLW; recycling; fusion; electric furnace; control; release threshold.*

Abréviations principales utilisées

ANDRA	Agence Nationale pour la gestion des Déchets et matières RAdioactives
CIRES	Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage
CSA	Centre de Stockage de l'Aube
DMO	Dossier du Maître d'Ouvrage
EDF	Electricité De France
FMA	Faible et Moyenne Activité
GV	Générateur de Vapeur
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
INB	Installation Nucléaire de Base
PNGMDR	Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs
TFA	Très Faible Activité

Introduction

Le projet de technocentre EDF à Fessenheim fait suite à la possibilité récemment ouverte par le 5e Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs (PNGMDR)[2] de valoriser les déchets dits de « *très faiblement activité* » (TFA) provenant principalement du démantèlement d'installations nucléaires (composants de 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 conventionnelle* sous forme de lingots d'acier, eux-mêmes très faiblement radioactifs.

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

- une *forte réduction du volume à venir des futurs déchets métalliques TFA* issus du démantèlement des centrales nucléaires et de l'usine d'enrichissement de l'uranium Georges Besse 1 ;

[2] Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs 2022-2026. https://www.andra.fr/publication-de-la-5e-edition-du-plan-national-de-gestion-des-matieres-et-dechets-radioactifs.

- une *forte réduction des besoins en surface pour le stockage des déchets TFA* sur le site actuel du CIRES[3] à Morvillers et La Chaise (département de l'Aube, France) ;
- une *éventuelle meilleure analyse de cycle de vie* que celle du stockage sur le site du CIRES ;
- un *éventuel intérêt économique* par revente des lingots dans les circuits industriels conventionnels non-nucléaires.

Cependant, le projet doit être analysé et évalué objectivement dans son ensemble – y compris ses objectifs de décontamination des métaux TFA en vue de leur réutilisation, les aspects physico-chimiques en jeu dans les techniques de fusion oxydante de métaux contaminés par radionucléides, les retours d'expérience à l'étranger – en tenant compte de toutes les alternatives possibles au technocentre lui-même.

La présente étude se propose de développer cette analyse du projet à partir des documents officiels mis à disposition du public sur le site du Débat Public Projet technocentre à Fessenheim[4], des cahiers d'acteurs des différentes parties prenantes déposés sur ce site – en particulier ceux de l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs (ANDRA), du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA), d'Orano (ex- New Areva), de l'Académie des technologies, de la Société Française d'Énergie Nucléaire (SFEN), de l'École Nationale Supérieure des Mines de Nancy (ENSMN), du Groupe de Scientifiques pour l'Information sur l'Énergie Nucléaire (GSIEN), de Global Chance, de la Fédération Nature Environnement (FNE), de Stop-Fessenheim, etc. – et des nombreuses contributions versées sur ce même site, à la lumière des études et articles scientifiques publiés dans les revues internationales à comité de lecture ou dans les conférences internationales portant sur les méthodes et les résultats des expériences de recherche sur la fusion des métaux radioactifs contaminés.

Après un bref rappel de quelques grandeurs physiques liées à la radioactivité, de la classification des déchets radioactifs en diverses catégories de gestion, et de la réglementation européenne sur les conditions d'exception et de libération (*clearance*) des déchets radioactifs sur le marché conventionnel (section 1), les *objectifs de réduction volumique des déchets radioactifs TFA* – argument-clé du projet – sont détaillés et examinés de prime abord (section 2) en fonction des scénarios de démantèlement et de programmation nucléaires de la politique énergétique française.

Les *aspects énergétiques, économiques et écologiques*, invoqués comme décisifs par le maître d'ouvrage EDF, sont étudiés dans un second temps (section 3) pour les comparer à ceux des alternatives possibles au projet.

La *faisabilité technique* et les *risques (contaminations, accidents)* du projet sont alors analysés (section 4) en s'appuyant sur un large corpus de données et de travaux scientifiques issus de la recherche indépendante et des organismes nucléaires à travers le monde, de manière à objectiver le mieux possible les contraintes radiologiques, métrologiques, physico-chimiques, et appréhender rigoureusement les incertitudes importantes dans ces domaines, susceptibles de complexifier les installations et d'accroître leurs coûts d'investissement et de fonctionnement.

Ces éléments d'information amènent finalement à questionner les *aspects juridiques* du projet de technocentre, abordés en dernière partie (section 5), pour conduire une réflexion sur la gouvernance globale d'un tel projet dans une société démocratique moderne.

1. Valorisation et seuils de libération des déchets radioactifs TFA

La classification des déchets radioactifs produits tout au long de la chaîne industrielle nucléaire – de la mine d'uranium à l'enrichissement de l'uranium naturel en isotope fissile ^{235}U, la fabrication des combustibles nucléaires, le fonctionnement des centrales nucléaires, le retraitement (en France) des

[3] Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage, géré par l'Agence Nationale des Déchets Radioactifs dans le département de l'Aube. https://aube.andra.fr/activites/stockage-des-dechets-de-tres-faible-activite/le-centre-industriel.
[4] https://participer-debat-technocentre-fessenheim.cndp.fr/.

combustibles irradiés usés, le conditionnement et l'entreposage des déchets radioactifs – distingue ces déchets suivant leur activité radiologique A (en becquerel[5] par kilogramme) et leur période $T_{1/2}$ de demi-vie radioactive, qui conditionnent leur gestion ultérieure par l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs (ANDRA)[6] :

- les déchets « *très faiblement radioactifs* » (TFA) : A < 100 kBq/kg
- les déchets « *faible activité* » (FA) : 100 kBq/kg < A < 1 GBq/kg
- les déchets « *moyenne activité* » (MA) : 1 GBq/kg < A < 1 TBq/kg
- les déchets « *haute activité* » (HA) : A > 1 TBq/kg
- les déchets « *vie très courte* » (VTC) : $T_{1/2}$ < 100 jours
- les déchets « *vie courte* » (VC) : $T_{1/2}$ < 31 ans
- les déchets « *vie longue* » (VL) : $T_{1/2}$ > 31 ans et jusqu'à plusieurs milliards d'années.

Les déchets radioactifs produits étant très nombreux et de nature radiologique mélangée, voire complexe, leur séparation nécessaire à leur entreposage différencié selon leur dangerosité requiert des opérations de tri, de découpe, de traitement chimique et de conditionnement spécifiques. Le PNGMDR détaille ces méthodes et les voies choisies pour leur entreposage temporaire ou définitif en fonction des catégories résumées dans le Tableau 1 ci-dessous.

<table>
<tr><th>période $T_{1/2}$
activité A</th><th>VTC</th><th>VC</th><th>VL</th></tr>
<tr><td>TFA</td><td rowspan="3">(VTC) gestion par décroissance radioactive en surface</td><td colspan="2">(TFA) CIRES stockage en surface</td></tr>
<tr><td>FA</td><td rowspan="2">(FMA) CSA, CSM stockage en surface</td><td>(FA-VL) stockage à faible profondeur (à l'étude)</td></tr>
<tr><td>MA</td><td>(MA-VL) La Hague, Marcoule – stockage en surface → projet Cigéo en site géologique profond à l'étude</td></tr>
<tr><td>HA</td><td></td><td colspan="2">(HA) La Hague, Marcoule stockage en surface → projet Cigéo en site géologique profond (en cours d'étude)</td></tr>
</table>

Tab. 1. *Catégories de déchets radioactifs et stockages associés*.

La libération des déchets TFA par recyclage dans des filières commerciales « conventionnelles », déjà pratiquée par d'autres pays nucléarisés (Allemagne, Grande-Bretagne, Suède, Suisse par exemple), est autorisée par la Directive Euratom 2013/59[7] qui notifie dans son *Annexe VII* les seuils d'activité radiologique massique maximaux applicables à 257 radionucléides encore présents dans les déchets sortants (Tableau 2). Ces seuils d'activité radiologique, alignés après simplification sur ceux définis par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), sont compris entre 10 (Bq/kg) et 10 MBq/kg de radioélément, et censés correspondre à une *dose efficace ajoutée* de 10 micro-sieverts[8] par an (10

[5] Le *becquerel* (Bq) est l'unité physique internationale d'activité d'un matériau radioactif, soit 1 désintégration par seconde. L'activité radiologique massique A/m d'un radioélément (en Bq/kg) est directement liée à la période de demi-vie radioactive $T_{1/2}$ (en s) de celui-ci par $A/m = N_A \ln 2/(M\, T_{1/2})$ où N_A est le nombre d'Avogadro ($N_A \approx 6{,}022.10^{-23}$ mol^{-1}) et M la masse molaire (en kg/mol) du radioélément.

[6] ANDRA, https://www.andra.fr/.

[7] Directive 2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013 (*lire en particulier l'Annexe VII*). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0059.

[8] Le *sievert* (Sv) est l'unité physique internationale, égale à une énergie de rayonnement de 1 joule reçue par 1 kilogramme de matière, soit 1 *gray* (1 Gy = 1 Sv = 1 J/kg), mesurant la *dose absorbée* (indépendamment de ses effets biologiques), la *dose équivalente* (produit de la dose absorbée par un facteur de pondération tenant compte du type de rayonnement α, β, γ (alpha, bêta, gamma) dans le tissu biologique humain irradié) et de la *dose efficace* (produit de la dose équivalente par un facteur de sensibilité de chaque tissu humain). Les doses efficaces sont multipliées par un facteur additionnel N spécifique à chaque espèce vivante (N = 1 pour l'espèce humaine).

µSv/an) retenue par l'AIEA[9] pour correspondre à un risque sanitaire statistique acceptable pour les individus dans la population générale, hors exposition professionnelle.

seuil de libération (Bq/kg)	radionucléides (nombre, %)		radionucléides principaux
10	1	0,4 %	iode 129
100	33	12,8 %	cobalt 60, césium 137, plutonium 239, américium 241
1 000	45	17,5 %	carbone 14, cobalt 58, fer 59, strontium 90, plutonium 236
10 000	75	29,2 %	cobalt 55, nickel 65, iode 131, cérium 144, plutonium 241
100 000	66	25,7 %	tritium ^{3}H, chrome 51, nickel 63, radium 227, neptunium 239
1 000 000	33	12,8 %	fer 55, strontium 89, , americium 242, plutonium 243
10 000 000	4	1,6 %	cobalt 58m, germanium 71, rhodium 103m, fermium 254
total	257	100 %	*Autres radionucléides : seuils à définir avec total 10 µS/an*

Tab. 2. *Seuils d'activité radiologique massique maximaux pour libération* (*d'après le tableau 3 de l'annexe 13-8 du Code de la Santé Publique*)[10].

Remarque 1 : bien que les isotopes radioactifs rares 230, 231, 232, 233, 236, 237, 239, 240 de l'*uranium* soient inclus dans les radionucléides du tableau 3 de l'annexe 13-8 du Code de la Santé Publique, les isotopes U-238 et U-235 n'y figurent pas alors qu'ils sont bien évidemment les isotopes principaux contenus dans les déchets radioactifs issus du démantèlement de l'usine d'enrichissement Georges Besse 1. Cette omission étonnante peut laisser perplexe, car ces deux isotopes sont pris en compte dans le tableau B de l'*Annexe VII* de la Directive 2013/59/Euratom pour notifier les « *valeurs d'exemption en concentration d'activité pour des quantités modérées et tout type de matière* », fixées à 10 kBq/kg pour les deux isotopes U-238 et U-235.

Remarque 2 : il est cependant spécifié dans le considérant 5 des considérations de cette directive : « *La présente directive prévoyant des règles minimales, les États membres devraient être libres d'adopter ou de maintenir des mesures plus strictes dans le domaine visé par celle-ci, sans préjudice de la libre circulation des marchandises et des services dans le marché intérieur telle qu'elle est définie par la jurisprudence de la Cour de justice* », ce qui doit juridiquement contraindre l'exploitant de l'installation responsable de la libération des matières radioactives sur le marché conventionnel à respecter cette limite, considérée comme minimale nécessaire au respect de la valeur de référence de 10 µS/an d'exposition des populations au risque de cancer. Dès lors, il est légitime de questionner cette absence des isotopes U-238 et U-235 dans l'annexe 13-8 du CSP dont relève nécessairement le projet de technocentre EDF, prévu pour accueillir et traiter les déchets métalliques TFA issus du démantèlement de l'usine Georges Besse 1, fortement contaminés en U-238 et U-235.

Remarque 3 : toujours en cas de dépassement des valeurs limites de concentration d'activité des radionucléides U-238 et U-235 dans les métaux libérés sur le marché conventionnel de l'acier, l'invocation du considérant 38 de cette directive, selon lequel « *Les États membres devraient pouvoir accorder une exemption spécifique d'autorisation pour certaines pratiques impliquant des activités dépassant les valeurs d'exemption* », pourrait être contestée en vertu de son caractère ponctuel, exceptionnel (« *certaines pratiques* ») et possiblement temporaire (il n'est pas fait état de *procédés industriels permanents* mais de *pratiques*), au vu des conditions restrictives du considérant 5, mais aussi du considérant 37 qui précise : « *Il est utile d'avoir les mêmes valeurs de concentration d'activité* [pour tous les États membres, NDLA]*, tant pour exempter des pratiques du contrôle réglementaire que pour libérer des matières issues de pratiques autorisées* ».

Dès lors, il est légitime d'interroger les garanties avancées dans le DMO du projet de technocentre selon lequel « *la dose efficace ajoutée pouvant être reçue par une personne du public susceptible d'être*

[9] La valeur de référence de 10 µSv/an correspond environ à une exposition au risque maximal de 1 cancer par million de personnes par an, basé sur le modèle d'une relation linéaire sans seuil d'augmentation proportionnelle du risque de cancer à la dose efficace reçue, quel que soit le niveau de cette dose, avec un coefficient de $5{,}7 \times 10^{-2}$ /Sv.

[10] Annexe 13-8 du Code de la Santé Publique. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000045171540.

exposée, quel que soit l'usage des lingots produits par le Technocentre, n'excédera pas 0,01 millisieverts (mSv) par an », et ceci en incluant tous « *les processus de traitement de la matière, de contrôle des opérations et de maîtrise de la qualité en place* » mis en œuvre dans le technocentre, ce qui paraît très difficile à assurer au vu des risques radiologiques lors des opérations de tri-découpe des déchets FMA-TFA et du procédé de fusion qu'il est prévu d'y déployer, mais aussi de la radioactivité résiduelle potentielle des lingots produits. Il est donc indispensable de bien décrire au préalable la structure du technocentre projeté et les opérations prévues (souvent manuelles) de traitement des déchets FMA-TFA.

2. Objectif et structure du technocentre de traitement de déchets TFA

La principale justification avancée par le **projet de technocentre EDF** est la forte réduction du volume de déchets métalliques TFA qu'il apporterait en comparaison à leur entreposage futur sur les sites du CIRES. Pour pouvoir examiner la validité de cet objectif, il est nécessaire de connaître le principe des opérations menées dans le technocentre (section 2.1) pour passer d'un vaste ensemble de nombreux déchets radioactifs entrant dans l'installation aux lingots d'acier sortants destinés à être vendus sur les marchés conventionnels, avant de questionner la réduction globale des volumes de déchets TFA et FMA (section 2.2) en la replaçant dans la problématique future de la gestion des déchets TFA et FMA (section 2.3), au regard des autres projets déjà engagés de stockage de ces déchets et des alternatives possibles (section 2.4).

2.1. Structure de principe du technocentre projeté

À cet effet, l'installation projetée comprendrait cinq zones sur une surface totale de 15 à 20 ha à l'intérieur du périmètre EDF jouxtant la centrale nucléaire de Fessenheim (figure 1) :

- une *zone d'entreposage* des pièces et colis métalliques radioactifs provenant des centrales nucléaires et de l'usine Georges Besse 1 (GB1) en démantèlement ; des déchets radioactifs FMA générés par le technocentre avant leur transport vers l'usine Centraco dans le Gard et vers le Centre de Stockage de l'Aube (CSA) ; des lingots d'acier produits par le technocentre avant leur expédition vers des utilisateurs potentiels ;
- un *bloc usine* incluant une zone de préparation des métaux radioactifs entrants (atelier de métrologie de la radioactivité, atelier de découpe des métaux, atelier de décontamination radioactive des surfaces, atelier de tri des métaux vers la zone d'entreposage des déchets radioactifs FMA et vers la zone-tampon d'entreposage des déchets radioactifs TFA avant fusion) ; l'atelier de traitement des déchets TFA (four de fusion à arc électrique, four de métallurgie secondaire à poche, atelier de coulées et de refroidissement en lingots, bancs de métrologie de la radioactivité des produits amont et aval) ;
- une *zone d'équipements* nécessaires au fonctionnement du bloc usine (en particulier pour la production, le stockage et la distribution des fluides de lutte anti-incendie et de nettoyage-collecte des contaminants radioactifs, de gaz et d'air comprimé, le stockage des filtres pour contaminants) ;
- la *zone électrique* (poste de transformation HT, protection, distribution, générateurs électriques de secours)
- la *zone administrative* (bâtiment tertiaires, parkings, livraisons, sécurité, surveillance).

D'autre part, le transbordement des matériaux radioactifs entrants dans le technocentre par voie fluviale et par voie ferrée nécessitera l'aménagement de zones dédiées, en particulier un quai spécifiquement dédié au déchargement des générateurs de vapeur (GV) radioactifs dans un des ports fluviaux voisins sur le canal d'Alsace.

Fig. 1. *Vue générale de la centrale nucléaire de Fessenheim (zone sud floutée) et de l'emplacement approximatif du technocentre EDF projeté sur son emprise nord (image sur Google Maps).*

La structure organisationnelle du technocentre peut être représentée par le diagramme fonctionnel ci-dessous (figure 2) qui met en relief d'une part le parcours des matériaux radioactifs entre l'entrée et la sortie de l'installation, et d'autre part les opérations industrielles sous irradiation dans l'installation. Les nombreux points obligatoires de *contrôle de la radioactivité* des matériaux en amont, pendant les différentes opérations de tri, de transformation et de conditionnement, mais aussi des fluides liquides et gazeux qui sortent des différentes zones de traitement sont indispensables à la vérification de la conformité aux normes européennes (évoquées dans la section 1) pour assurer la radioprotection des employés œuvrant dans le technocentre, la sécurité des populations environnantes et plus largement celle du public général utilisant les aciers de très faible radioactivité remis par le technocentre dans les circuits commerciaux. Cependant, la réalisabilité de ces contrôles radiologiques, la fiabilité des méthodes de mesure et la surveillance administrative rigoureuse de ces suivis font l'objet d'incertitudes importantes (*cf*. section 4).

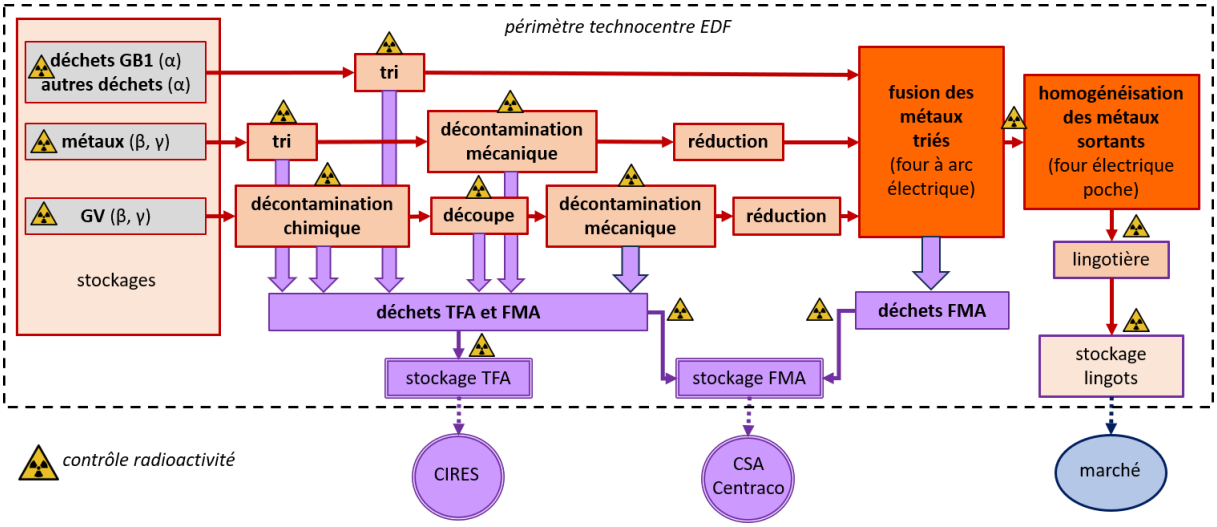

Fig. 2. *Schéma de principe du technocentre EDF Fessenheim projet et points de contrôle de radioactivité.*

2.2. Interroger la réduction de déchets TFA par le projet de technocentre EDF

Le projet de technocentre à Fessenheim, tel qu'il est présenté dans les documents EDF (dossier de maître d'ouvrage, feuille de route, diaporama), envisage de collecter pendant la durée prévue de son fonctionnement (environ jusqu'à 2055) quelque 492000 t de déchets métalliques radioactifs :

- 214 000 t d'émetteurs β (bêta)[11] et γ (gamma)[12] provenant du démantèlement progressif du parc nucléaire EDF actuel, dont 130 000 t issues des générateurs de vapeur (GV) usés ;
- 195 000 t d'émetteurs α (alpha)[13], dont 136 000 t provenant du démantèlement de l'usine d'enrichissement d'uranium par diffusion gazeuse Georges Besse 1 près de Tricastin ;
- 83 000 t d'émetteurs α, β et γ provenant d'installations nucléaires du CEA.

Cependant, les déchets TFA sont intimement unis à des déchets FMA à l'intérieur des déchets de démantèlement des installations nucléaires. Par exemple, seule la partie secondaire (75 % en masse) des GV est considérée comme déchet TFA susceptible d'être récupérée ; les 20 % de la partie primaire sont des déchets FMA à évacuer au CSA, et les 5 % restants deviennent de nouveaux déchets TFA à expédier au CIRES. Environ 95 % des autres déchets métalliques sont identifiés comme déchets TFA valorisables.

Par conséquent, environ 441 000 t d'aciers (soit environ 90 % des déchets entrants) seraient produits par le technocentre sous forme de lingots potentiellement commercialisables. L'ouverture de l'activité du technocentre aux déchets nucléaires TFA provenant d'autres pays européens est aussi évoquée dans le DMO ; cependant, aucune étude de marché n'est produite à l'appui de cette hypothèse qui semble plutôt en contradiction avec les politiques mises en place par les autres pays européens dans la conduite du démantèlement de leurs installations et la gestion de leurs déchets TFA.

Par ailleurs, la production de ces 441 000 t de lingots (d'aciers ou de fontes selon le taux de carbone et d'éléments d'alliages ajustés dans le four poche, cette proportion n'étant actuellement pas clairement précisée dans le dossier) générerait environ 75 000 t de **déchets TFA** et 25 000 t de **déchets FMA** de traitement, issus des laitiers récupérés, des parties primaires des GV (fond hémisphérique, plaque tubulaire et faisceau tubulaire) et des filtres sur gaz et poussières émis par les différentes opérations de découpe et de décontamination mécanique. Ces déchets FMA de traitement doivent nécessairement être conditionnés dans des emballages métalliques scellés, entraînant une augmentation importante du volume total de ces déchets à stocker sur le technocentre avant de les envoyer au site de stockage CSA de l'ANDRA dans l'Aube.

La transformation en lingots de ces métaux TFA par procédé de fusion (fours à arc électrique) permettrait une ***réduction potentielle de leur volume total*** d'environ 450 000 m^3, surtout grâce aux opérations de découpage-fusion des parties secondaires des quelque 350 GV usagés issus des 18 centrales nucléaires EDF (le volume occupé par un GV est de l'ordre de 560 m^3, soit un volume total de 200 000 m^3 qui seraient potentiellement retirés du CITES, diminués du volume des nouveaux conteneurs de déchets TFA produits par le technocentre. Les données du DMO ne permettent pas d'évaluer le volume restant des autres déchets métalliques TFA, de l'ordre de 250 000 m^3). Cette réduction de volume de déchets TFA, si elle est effective, représenterait 69 % de la capacité actuelle de stockage du CIRES (650 000 m^3) qui entreposait un peu plus de 450 000 m^3 fin 2022, soit environ 526 000 m^3 fin 2025. On peut donc penser que la réduction annoncée de volume de déchets métalliques TFA représente un avantage important pour le CIRES.

Cependant, l'ANDRA a déposé en 2024 une demande d'augmentation de 300 000 m^3 de capacité de stockage du CIRES pour atteindre 950 000 m^3 *sans augmentation de surface du site*, demande

[11] Émetteur β : noyau atomique instable se stabilisant en émettant un électron (radioactivité β^-) par mutation d'un neutron en proton, ou un positon (radioactivité β^+) par mutation d'un proton en neutron.

[12] Émetteur γ : noyau atomique instable se stabilisant énergétiquement en émettant un photon gamma (rayonnement électromagnétique de fréquence supérieure à 10^{17} Hz.

[13] Émetteur α : noyau atomique instable se stabilisant en émettant un noyau d'hélium $^4_2He^{2+}$ (deux protons + deux neutrons), appelée particule α).

autorisée en juillet 2024 et permettant environ 15 années supplémentaires d'entreposage de déchets TFA (sans technocentre).

2.3. Temporalités et problématique de la gestion de déchets TFA en France

Ceci amène à formuler plusieurs observations :

- les ***temporalités de la gestion des déchets TFA ne sont pas en phase*** : *celle de la création du technocentre EDF*, prévue en 2027, avec une mise en service en 2031, pendant lesquelles environ 150 000 m^3 de déchets TFA (dont 44 % de déchets métalliques) viendront s'accumuler au CIRES ; *celle de l'extension de la capacité de stockage du CIRES*, déjà opérationnelle (autorisée en juillet 2024) ; *celle des démantèlements des 18 centrales nucléaires* encore en fonctionnement, et dont la prolongation supposée de service jusqu'à 60 ans (le dernier réacteur s'arrêterait vers 2060) reste encore largement incertaine du fait des risques de rupture des cuves nucléaires les plus fragiles[14] ; *celle du démantèlement de l'usine Georges Besse 1* qui ne produira ses déchets métalliques TFA qu'à partir de 2042 jusqu'en 2046. Or, la gestion holistique des nombreuses temporalités, d'échelles très différentes et parfois contradictoires, est une nécessité pour la mise en œuvre efficace des transitions énergétiques[15] ;
- les coûts d'investissement annoncés des deux projets (technocentre : 450 M€ ; extension CIRES : 21 M€) doivent être ajoutés aux coûts de fonctionnement et de démantèlement, ce qui reste à évaluer pour le technocentre. L'ANDRA évoque un coût de stockage de l'ordre de 500 €/m^3 de déchet entreposé, ce qui représenterait une économie totale de 250 M€ pour le CIRES si le technocentre était mis en œuvre à un coût d'investissement environ double et des coûts de fonctionnement beaucoup plus élevés. Les coûts de transport des déchets TFA entrant et sortant du technocentre ou vers le CIRES devraient être assez comparables ;
- le volume total à venir des déchets TFA (métaux, gravats) de démantèlement des installations nucléaires en France est estimé par l'ANDRA à 2,4 millions de m^3, ce qui doit être comparé aux 950 000 m^3 autorisés au CIRES et aux 450 000 m^3 potentiellement pris par le technocentre. Il semble assez évident que la dimension du problème dépasse de loin les capacités actuelles de stockage, avec ou sans traitement. Considérer comme absolument prioritaire de réduire le volume des déchets métalliques TFA en les transformant en lingots remis en circulation – au prix d'un ***coût financier et énergétique plus important***, d'un *risque radiologique potentiellement plus élevé* et d'un *modèle économique incertain* (*cf.* section 3) – par rapport au stockage de ces déchets TFA sur le site du CIRES semble davantage relever d'un pari que d'un choix objectif évident. En effet, comme l'indique l'Autorité Environnementale dans son rapport[16] sur le projet d'extension du CIRES, les mesures de libération des déchets TFA métalliques et non métalliques « *ne sont pas suffisantes pour remettre en cause la nécessité d'une extension de la capacité de stockage et l'augmentation de capacité de 300 000 m 3 ne dispense pas de la création d'un nouveau centre de stockage centralisé, dont la localisation n'est pas encore arrêtée au regard de l'estimation de 2 300 000 m3 de déchets TFA à prendre en charge* ». L'ordre de grandeur des volumes de déchets TFA à venir devrait plutôt inciter à ***étudier les alternatives fiables et de long terme*** à ces modes de stockage et de valorisation.

[14] De Larochelambert T., *Étude des risques de rupture de cuves nucléaires irradiées âgées par chocs froids sous pression accidentels.* Risques, Études et Observations 2024-2, pp. 149-174, CERDACC - Université de Haute-Alsace. https://www.riseo.cerdacc.uha.fr/2024-2/.

[15] De Larochelambert T., *Transitions énergie-climat : concilier les temporalités, entre recherche, planification et démocratie*. Colloque de l'Institut Universitaire de France 2025 « Le Temps », 18-20 juin 2025, Besançon, France. https://www.researchgate.net/publication/393232482_Transitions_energie-climat_concilier_les_temporalites_entre_recherche_planification_et_democratie.

[16] Autorité Environnementale, Avis délibéré n° 2023 85, 9 novembre 2023. https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/231109_cires_delibere_cle647355.pdf.

2.4. Alternatives possibles au projet de technocentre EDF à Fessenheim

Dans la philosophie holistique de la prospective énergétique, l'ensemble des possibles (ici, l'énergie nucléaire, le système énergétique, la gestion des déchets et matières radioactives) doit être considéré du point de vue de l'intérêt général, de la morale publique, des choix de société (valeurs morales et humanistes, organisation sociale et économique, relation au monde et à la nature, vérité scientifique, utilisations et développements technologiques).

Si l'on aborde la gestion générale des déchets radioactifs TFA et FMA produits par le système énergétique nucléaire dans le passé mais aussi possiblement dans le futur, selon les choix ultérieurs supposés éclairés qui seront démocratiquement adoptés pour l'avenir du système énergétique en France, il devient légitime et moralement nécessaire de considérer que le département de l'Aube et sa population n'ont pas vocation à supporter à eux seuls la charge du stockage de tous les déchets radioactifs TFA et FMA de toute la France. Cette interrogation est aussi celle de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) : « *le bénéfice sociétal que ces acteurs considèrent tirer de l'accueil d'installations de stockage sur leur territoire sera-t-il toujours perçu comme tel ? En particulier lorsque – à court terme-se posera la question de l'extension de capacité ? Cet accord engage en effet avec lui les générations à venir et fait porter à une très faible fraction de la population les nuisances liées à la gestion des déchets en provenance de l'ensemble du pays. Si le risque radiologique pour le stockage des déchets TFA est à l'évidence très faible, les nuisances liées notamment au transport de ces déchets qui convergent vers ce centre unique, l'inquiétude que peut susciter la présence des déchets et l'image négative qu'elle peut donner au territoire sont des éléments qui pourraient cristalliser à l'avenir la contestation de la politique aujourd'hui mise en œuvre* »[17].

La question des *alternatives au stockage TFA du CIRES* est donc posée. Elle été abordée dans le 5e PNGMDR qui a considéré que « *Le développement d'installations décentralisées de stockage des déchets TFA proches des sites nucléaires permettrait une réduction de la consommation énergétique et des émissions des gaz à effet de serre liées aux transports, ce qui constituerait un point favorable. Les impacts pour la santé et l'environnement de telles installations, même s'ils sont faibles, compte tenu du niveau de radioactivité des déchets considérés, pourront être comparés aux impacts évalués pour le stockage du CIRES ou d'un nouveau site de stockage centralisé. Cette comparaison pourrait être rapportée aux gains obtenus en matière de transports* »[18]. Cependant, l'étude de faisabilité de la ***création d'installations de stockage décentralisées***, ainsi qu'une analyse relative à la possibilité de stocker des déchets de très faible activité dans des installations de stockage de déchets dangereux, ont été menées par le groupe de travail PNGMDR (CEA, EDF, Framatome, Orano, en lien avec l'ANDRA)[19] en considérant un enfouissement étanche en subsurface sur un emplacement spécifique à chaque établissement (celui de Creys-Malville pour EDF). Elles concluent logiquement défavorablement à la création de ces stockages décentralisés enterrés pour des raisons liées à la perméabilité des terrains, aux surcoûts par rapport au stockage CIRES.

Une ***solution alternative au technocentre et à une extension ultérieure du CIRES*** peut alors être techniquement et économiquement envisagée, étudiée et mise en débat : chacun des 18 sites nucléaires EDF actuels pourrait prendre en charge sur place le stockage des déchets FMA et TFA de son démantèlement, après évacuation des barres de combustibles et nettoyage des circuits secondaires et primaires. 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 nécessaires à la décroissance de la radioactivité

[17] IRSN (2016), *Déchets radioactifs de très faible activité : la doctrine doit-elle évoluer ? Réflexions de l'IRSN pour une gestion pérenne, équitable et responsable*. Rapport IRSN/DG/2016-00002. https://recherche-expertise.asnr.fr/sites/default/files/documents/expertise/rapports_expertise/IRSN-DG-2016-00002_Dechets-TFA-Doctrine.pdf.

[18] Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs 2022-2026. https://www.andra.fr/sites/default/files/2023-01/PNGMDR_2022.pdf.

[19] GT PNGMDR, 30 décembre 2023. https://reglementation-controle.asnr.fr/Media/Files/00-PNGMDR/reunions-pngmdr/etude-sur-la-faisabilite-de-solutions-de-stockage-decentralisees-de-dechets-tfa-en-reponse-a-l-article-16-de-l-arrete-du-9-decembre-2022-edf.

des déchets TFA-FMA avant d'envisager leur recyclage possible. Les cuves nucléaires irradiées elles-mêmes pourraient, après décontamination chimique et mécanique, rester en place dans leurs bâtiments réacteurs. Cette solution 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. Seule, l'une des deux cuves nucléaires de Fessenheim ou les deux devraient pouvoir faire l'objet d'un découpage minutieux en éprouvettes-tests pour projet d'étude scientifique européen sur le vieillissement réel des cuves nucléaires commerciales des réacteurs à eau pressurisée par un consortium de laboratoires de recherche[20] (ce qui n'a jamais été fait jusqu'à présent), afin de combler les lacunes scientifiques mondiales dans ce domaine et mieux prévoir les risques de rupture de cuves nucléaires par chocs froids sous pression au-delà de 40 ans de service.

Il convient au préalable d'examiner plus précisément les bénéfices et inconvénients économiques, énergétiques, écologiques et radiologiques, ainsi que l'efficacité-même du projet de technocentre EDF à Fessenheim en vue de la réutilisation des lingots produits, en comparaison avec les solutions alternatives, de manière à pouvoir décider de la mise en œuvre de la ou des solutions retenues, en toutes transparence, indépendance et conscience, par un choix éclairé et démocratique.

3. Aspects écologiques, énergétiques et économiques du projet

Les impacts écologiques potentiels d'un projet tel que celui du technocentre EDF sont multiples et impliquent autant les aspects énergétiques (pollutions atmosphériques et sonores liées aux transports des matériaux d'entrée et de sortie, et aux activités des processus internes ; pollutions chimiques des effluents liquides) que radiologiques (dispersion de radionucléides dans l'installation et l'environnement, irradiation des personnels, radioactivité résiduelle des lingots, stockage et transport des déchets radioactifs entrants et sortants). L'analyse complète du cycle de vie prospective du technocentre EDF projeté, examinée ci-dessous (section 3.1), doit donc être complétée par une analyse détaillée de ses impacts radiologiques possibles (regroupés en section 4.2). Ces impacts ne sont pas sans conséquence sur le modèle économique du projet, abordé ci-dessous (section 3.2).

3.1. Analyse de cycle de vie

Dans l'analyse du cycle de vie (ACV) du projet de technocentre EDF, 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, impacts radiologiques) et de son démantèlement. Une étude en cours[21] semble montrer une baisse significative d'impact environnemental global de l'option technocentre sur l'option entreposage au CIRES, mais elle est encore très partielle par manque de données suffisantes et de validation d'hypothèses (sur les quantités de déchets TFA et FMA, l'intégration de tous les transports sur le périmètre de la France, les sources d'énergie, les quantités d'effluents, les procédés de métallurgie secondaire, etc.) et devrait être étendue et complétée 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. Une analyse d'impact de cycle de vie

[20] De Larochelambert T., *Sûreté, démantèlement, prolongation de fonctionnement des réacteurs nucléaires et transition énergétique*, , dans « Sûreté de sécurité des installations nucléaires civiles », pp 85-147, CERDACC, Université de Haute-Alsace, Editions Mare & Martin, janvier 2021, ISBN 978-2-84934-536-8. https://www.mareetmartin.com/livre/surete-et-securite-des-installations-nucleaires-civiles.

[21] Guendouz Z., Sahel A., Kozderka M., Quaranta G. (2024). *Analyse du Cycle de Vie des traitements de déchets à très faible activité : cas du démantèlement de Fessenheim*, OHM Fessenheim. https://ohm-fessenheim.fr/wp-content/uploads/08_michalKozderka_acy-vitrefa_2024.pdf.

prospective par la méthode CML-IA de l'Institut des Sciences Environnementales de Delft, menée récemment[22] sur le démantèlement complet de la centrale nucléaire de Fessenheim (sans hypothèse technocentre), constate que *« le démantèlement des centrales nucléaires nécessite encore des études approfondies basées sur des ensembles de données exhaustifs et transparents. D'ici là, les évaluations prospectives de pointe et la transférabilité des résultats de l'ACV à des études futures sont fortement limitées* ». Bien que la catégorie des radiations ionisantes ne soit pas prise en compte dans la méthode utilisée car « *aucune donnée n'était disponible concernant les effluents radioactifs générés par le démantèlement* », les auteurs arrivent à la conclusion, comme l'auteur du présent article, selon laquelle « *une réduction globale des émissions de GES nécessiterait donc soit des installations décentralisées de stockage ou de recyclage, soit une modification de la législation afin de mettre en place un seuil de rejet des déchets radioactifs de faible activité* ».

Parmi les impacts environnementaux, celui des consommations énergétiques examinées dans la section suivante représente la part la plus importante quantitativement, si l'on met à part les impacts possibles mais non évalués des contaminations et irradiations ionisantes.

3.2. Estimations des consommations

Les consommations énergétiques moyennes annuelles de fonctionnement du technocentre en électricité (60 GWh/an, soit 1 800 tCO_{2eq}/an émises), en gaz naturel (1 250 t/an, soit 19 GWh/an, 3 512 tCO_{2eq}/an émises), en propane (500 kg, soit 6,9 MWh/an et 1,5 tCO_{2eq}/an émise) figurant dans le DMO du technocentre n'étant pas détaillées par poste font l'objet d'hypothèses qui nécessitent d'être précisées pour être validées. Ces données 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).

À ces consommations de fonctionnement, doivent s'ajouter celles des transports prévisionnels par camions et par barges des déchets entrants et sortants à travers toute la France (7 camions par jour de déchets TFA en conteneurs, 5 à 6 barges et 10 à 18 camions de GV2 par an, 2 à 3 camions par jour de lingots sortants, 1 camion par mois de déchets radioactifs liquides sortant, plus tous les transports non précisés de déchets TFA évacués vers le CITES et de déchets FMA évacués vers le CSA), ainsi que toutes les consommations d'énergie pendant la durée de construction puis de démantèlement du technocentre, non documentées mais prépondérantes dans la phase initiale, particulièrement en termes d'émissions de gaz à effet de serre directes (combustibles) et indirectes (bétons, ferrailles, aciers, etc.).

Au vu des besoins en électricité prévus par la transition énergétique locale et nationale, en particulier pour l'électrification urgente 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 technocentre EDF projeté.

En outre, 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, ce qui interroge le caractère représentatif et la valeur d'engagement du DMO. Ils ont été avancés par EDF en réponse aux questions de citoyens, avec une estimation de l'ordre de 85 000 m^3 sur la totalité des cinq années du chantier, et de 120 000 m^3 par an en phase de fonctionnement de l'installation, mais sans fournir de détails sur les bases de leur calcul. Cette consommation annuelle d'eau n'est pas négligeable (2,9 % de la consommation de la ville de Colmar en 2023) et doit être prise en compte dans le bilan environnemental du technocentre et dans la répartition future des besoins en eau entre les

[22] Iguider M., Robineau P., Kozderka M,, Boltoeva M., Quaranta G. (2024). *Life cycle assessment of an upcoming nuclear power plant decommissioning: the Fessenheim case study from public data*, The International Journal of Life Cycle Assessment 29:1229–1245. https://doi.org/10.1007/s11367-024-02315-9.

différents utilisateurs. Il est à noter qu'aucune statistique de consommation d'eau de l'installation Cyclife Sweden de recyclage de déchets métalliques TFA n'est donnée dans le DMO ni publiée par EDF et sa filiale. D'autre part, la production d'effluents liquides et gazeux radioactifs à l'issue des opérations de nettoyage, si elle est évoquée dans le DMO, n'y est pas quantifiée non plus, comme le mentionne l'étude sur l'analyse d'impact du cycle de vie citée plus haut (Réf. 22).

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.

3.3. Aspects économiques

Un des arguments principaux avancés pour justifier la construction du technocentre EDF est la valorisation des lingots d'acier produits par le technocentre sur le marché conventionnel, présentée par EDF comme plus écologique et vertueuse que la même production d'acier par extraction minière à quantité produite égale, avec 40 % d'énergie consommée en moins et 57 % de gaz à effet de serre émis en moins.

En réalité, ce n'est bien sûr pas à la production d'acier primaire qu'il faut comparer la production d'acier de recyclage du technocentre mais aux autres productions d'acier par recyclage industriel sur le marché européen. Le résultat des calculs précis comparés en termes d'énergie (et donc de gaz à effet de serre) est alors en défaveur du technocentre : la consommation électrique par tonne d'acier recyclé produit par le procédé de fusion électrique du technocentre projeté s'avère en effet environ **2,6 fois plus élevée** que celle de l'acier recyclé produit par aciérie à four électrique. Ceci interroge grandement le modèle économique et énergétique du technocentre, sans compter le caractère peu attractif des aciers du technocentre issus de métaux radioactifs et des incertitudes sur leur radioactivité résiduelle (*cf*. section 4). Par conséquent, 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.

Par ailleurs, pour être intégré dans un plan de financement et d'évaluation du prix de revient de la tonne de lingots produite, le coût d'investissement annoncé pour la création du technocentre, évalué à 450 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, le coût annuel global de fonctionnement, le prix de revient unitaire de la tonne d'acier produite par le technocentre ne sont pas établis ni explicités dans les documents mis à disposition, ce qui rend difficile toute évaluation économique globale du projet. Le seul coût d'investissement (hors fonctionnement et démantèlement) rapporté à la production totale de lingots (supposés tous en acier et non en fonte) porterait le prix de la tonne d'acier produite à plus de 1000 €, soit de 3 à 6 fois le coût d'investissement *annuel* de la tonne d'acier produite par four électrique pour le projet de décarbonation d'ArcelorMittal Méditerranée à Fos-sur-Mer[23].

La forte consommation d'énergie et 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). On ne peut, en l'absence de données économiques précises par le maître d'ouvrage, qu'évaluer l'intensité énergétique rapportée aux investissements – et non au fonctionnement – et aux emplois annoncés (200), soit 5 700 €/MWh consommé (prix très élevé, que l'on pourrait répartir sur la durée des quelques années de fonctionnement et ajouter au coût de

[23] https://www.debatpublic.fr/sites/default/files/2025-04/DebatFBP-ArcelorMittal-DMO.pdf.

fonctionnement par MWh consommé) et 2,25 M€/emploi créé (1,5 fois plus cher que pour l'évènement Choose France 2025).

Ces incertitudes tant écologiques qu'économiques se voient possiblement amplifiées par les incertitudes sur l'efficacité du procédé de fusion des déchets TFA qualifié de « décontaminant » par EDF, et sur les contrôles et conséquences radiologiques du fonctionnement du technocentre projeté.

4. Incertitudes techniques et scientifiques

La littérature scientifique internationale actuelle permet de mieux caractériser le procédé de fusion des déchets TFA et d'évaluer les incertitudes quant à son efficacité réelle à séparer les radionucléides qu'ils contiennent en amont de la coulée des lingots d'acier. Elle renseigne également sur les effets radiologiques liés aux faibles doses de radiations reçues par les employés des installations nucléaires et les populations environnantes.

4.1. Incertitudes techniques sur le procédé de séparation des radioéléments

La revue des publications scientifiques internationales sur l'évaluation de l'aptitude de la fusion des déchets radioactifs métalliques TFA et FMA à séparer les éléments radioactifs et non radioactifs dans les aciers en fusion, et des 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[24].

Pour séparer les atomes métalliques radioactifs du reste des déchets TFA, le projet de technocentre EDF se base sur le procédé de fusion des déchets métalliques radioactifs en présence d'air et d'oxygène injecté dans un four à arc électrique dans lequel les métaux oxydés solides sous forme d'oxydes, carbonates, aluminates et silicates se retrouvent dans la phase légère appelée « laitier » qui surnage sur la phase métallique liquide non oxydée. Dans le DMO, EDF présente ce procédé de fusion comme « *décontaminant* » en supposant que « *l'uranium et les principaux éléments radioactifs sont oxydés et forment des composés de densité plus faible que le métal liquide et migrent donc dans le laitier* ». La réalité physique est très différente et beaucoup plus nuancée.

D'un point de vue strictement physique en effet, ***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 et donc de son caractère radioactif ou non.

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 standard[25] $\Delta_r G(T)$ en fonction de la température dans un diagramme d'Ellingham[26]. Par exemple, la courbe d'oxydo-réduction du cobalt à l'oxygène ($2\ Co + O_2 = 2\ CoO$, courbe verte) étant très au-dessus de celle du fer ($2\ Fe + O_2 = 2\ FeO$, courbe rouge) dans le diagramme d'Ellingham (figure 3), 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

[24] CNDP technocentre EDF Fessenheim – Cahiers d'acteurs. https://www.debatpublic.fr/projet-technocentre-fessenheim/les-cahiers-dacteurs-6161.

[25] Enthalpie libre standard d'une réaction chimique de référence : $\Delta rG° = \Delta rH° - T\,\Delta rS°$, où $\Delta rH°$ est la variation d'enthalpie et $\Delta rS°$ la variation d'entropie lors de la réaction standard (tous les réactifs et produits de la réaction étant dans leur état standard à 1 bar et à la température T considérée.

[26] Björkvall J., Ye G., Lindberg M. (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

pourrait alors flotter au-dessus du bain en s'agglomérant à la phase solide surnageante (laitier). Il en est de même du nickel, du zinc, du césium, de l'argent (radioactifs ou non).

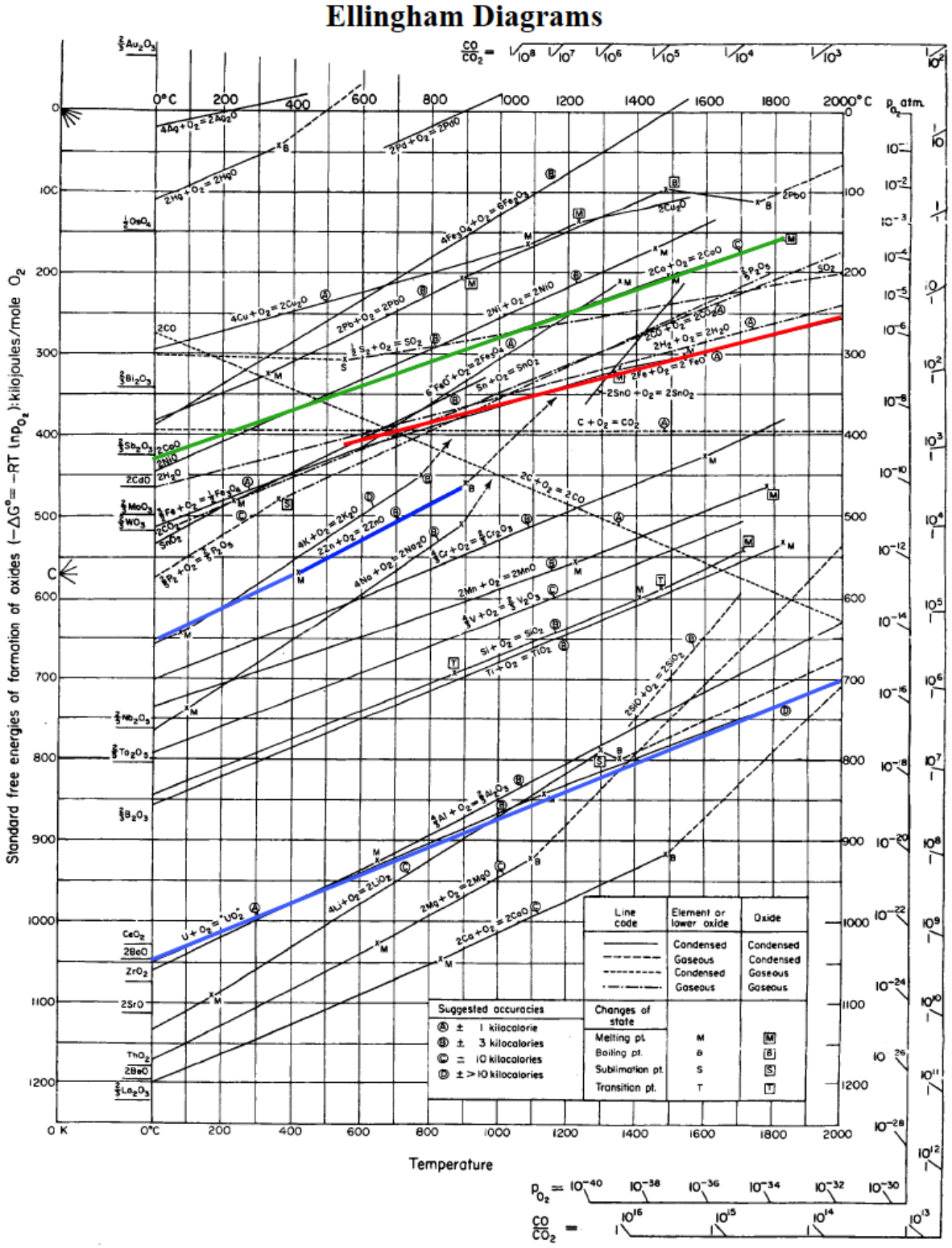

Fig. 3. *Diagramme d'Ellingham des principaux métaux* (*la courbe du cobalt Co/CoO en vert est très au-dessus de celle du fer Fe/FeO en rouge*) [Réf. 17].

C'est en revanche possible avec l'uranium qui s'oxyde facilement en UO_2 ($U + O_2 = UO_2$, courbe bleu clair en bas), sa courbe d'Ellingham étant très en dessous de celle du fer. L'ajout de composés chimiques (CaO, CaF_2, Al_2O_3, MgO, SiO_2, etc.) peut cependant 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 par fusion peu efficace pour ces éléments, comme le montrent les retours d'expérience des installations Carla de Siempelkamp à Krefeld en Allemagne[27].

Les principaux résultats sont présentés dans le Tableau 3 ci-dessous.

radionucléide	période de demi-vie radioactive $T_{1/2}$	fraction laitier/bain liquide (%)
fer 55	2,7 ans	0 – 1
cobalt 60	5,3 ans	0 – 11
césium 137	30 ans	0 – 5
nickel 63	100 ans	10
antimoine 125	2,7 ans	4
zinc 65	244 jours	12
strontium 90	28,7 ans	95 – 100
plutonium 241	14,3 ans	99
américium 241	432,6 ans	99
uranium 235	0,7 milliards d'années	99
uranium 238	4,5 milliards d'années	99

Tab. 3. *Périodes de demi-vie et taux de récupération de radioéléments dans le laitier* (*en %*).

Il apparaît que le procédé de fusion n'est réellement sélectif que pour l'uranium, les transuraniens et le strontium 90, ce qui concerne surtout les diffuseurs de l'usine d'enrichissement d'uranium Georges Besse 1. Il est à noter par ailleurs que le carbone 14 présent dans les aciers se retrouve essentiellement dans les poussières (95 %) et dans le laitier (5 %).

Plus précisément, 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[28,29]. Elles montrent par exemple que l'addition d'un mélange {40 % de SiO_2, 40 % de CaO, 20 % de Al_2O_3} accroîtrait le transfert du cobalt dans le laitier à 12 %.

Les faibles taux de récupération des radioéléments courants comme le Fe-55, le Co-60, le Cs-137 et le Ni-63 doivent être mis en regard des proportions (en % d'atomes) et des activités radiologiques (en kBq/kg) 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 environnant*** l'installation de récupération des déchets TFA et FMA, comme le montrent les évaluations menées par des chercheurs slovaques[30], qui préconisent des études de sûreté, de faisabilité et des calculs de coûts-bénéfices détaillés pour prouver la sécurité, l'opérabilité et l'effectivité des scénarios de recyclage[31].

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

[28] Lee J-H. (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

[29] Min B.-Y., Choi W-K., Oh W-Z., Jung C-H., Lee K-W. (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

[30] Slimák A., Nečas V. (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

[31] Hrncir T., Strazovec R., Zachar M. (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

D'autre part, le taux de contamination par radioélément 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[32], ce qui peut affecter 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 au sein du technocentre projeté, qui se répercutent sur 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 envisagés en Corée du Sud) avant libération et recyclage dans les circuits des aciéries.

Le ***risque d'utilisation du technocentre pour y diluer des déchets FA beaucoup plus radioactifs que les déchets TFA*** en les mélangeant à ceux-ci n'est pas inexistant et pourrait devenir réel si les mesures de radioactivité des déchets entrant dans le technocentre n'étaient pas contrôlées par un organisme indépendant comme doit l'être l'Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection (ASNR). Il est à noter que l'ASNR elle-même s'inquiétait de cette possibilité avant l'élaboration du projet de technocentre, dans son avis du 18 février 2016 à propos de l'éventualité de la mise en place d'un seuil de libération des déchets métalliques TFA : « *Les mesures préalables à la libération seraient complexes et longues, tout particulièrement dans le cas de grandes quantités de matériaux, en vrac ou contaminés par de nombreux radionucléides.* (…) *Une telle mise en place pourrait inciter au recours à la dilution, pratique difficilement détectable* »[33].

On sait en particulier que les critères d'acceptation des déchets nucléaires TFA-FMA dans les installations de la filiale EDF Cyclife (Centraco, Cyclife Sweden) sont de 20 000 kBq/kg pour les radioéléments émetteurs β et γ, et 370 kBq/kg pour les radioéléments émetteurs α, très supérieurs à la radioactivité limite de 100 kBq/kg des déchets TFA. Ceci renforce le questionnement que l'on peut légitimement formuler quant au contrôle et au risque de l'utilisation de dilution de déchets faiblement à moyennement radioactifs dans une installation de fusion des déchets TFA.

Le choix de la technologie de traitement des déchets métalliques TFA par fusion dans un four à arc électrique est lui-même questionnable, comparé aux autres technologies disponibles et déjà testées. Une étude complète et approfondie, menée récemment en Corée du Sud par l'Institut de recherche sur l'Énergie Atomique Coréen et l'Institut de Sûreté Nucléaire Coréen[34], compare les différents procédés connus suivant leurs risques radiologiques et accidentels (explosion de vapeur, rupture de poche de coulée, ébullition excessive, perte de puissance), leur efficacité de décontamination, leurs coûts CapEx et OpEx : traitement centrifuge à arc plasma, fusion à arc électrique, fusion par induction à air, fusion par induction sous vide, fusion par induction sous vide avec refusion électrique des scories. Il apparaît que la technique choisie par EDF (fusion à arc électrique) requiert une découpe fine des déchets métalliques TFA pour éviter l'endommagement des électrodes (et donc beaucoup de manipulations contaminantes en aval), pose un grand défi quant aux émissions de poussières et de fumées beaucoup plus importantes que pour les procédés à induction ou à plasma, et produit beaucoup de déchets contaminés (réfractaires de four, laitiers, poussières de procédé). De plus, les problèmes liés à la nécessité de trier les déchets radioactifs en amont pour obtenir des produits finis de haute qualité (en termes d'activité résiduelle) sont encore plus importantes dans le cas de la fusion à l'arc électrique, en raison de la taille plus importante du four et de la nécessité d'utiliser des déchets très finement broyés pour éviter d'endommager les électrodes. En particulier, la fusion par arc électrique pourrait entraîner des contaminations croisées entre déchets radioactifs fondus par le biais des fonds résiduels

[32] *Cf.* réf. 21.

[33] Avis n°2016-AV-0258 de l'Autorité de Sûreté Nucléaire. https://reglementation-controle.asnr.fr/content/download/102322/file/2016-AV-0258.pdf.

[34] Jeong K. et al., (2022). *Considerations on the preliminary safety assessment for operation of the melting facility for radioactive metal waste from nuclear facilities*. Annals of Nuclear Energy 175, 109213. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109213.

de four. Les auteurs présentent les résultats de leur étude comparative sous forme de classements des procédés par objectifs :

- sur le plan de la *sûreté* des procédés, les auteurs classent la fusion par arc électrique dans les catégories « *mauvaise* » (pour les contacts physiques), « *la pire* » (pour les risques d'inhalation ou d'ingestion et le confinement des poussières et fumées), « *moyenne* » pour la préservation des ressources naturelles ;
- sur le plan *économique*, les auteurs concluent que la fusion par arc électrique se range dans les catégories « *mauvaise* » (coûts CapEx et coûts opérationnels liés aux responsabilités potentielles vis-à-vis des contaminations), « *moyenne* » (coûts opérationnels de procédé, des volumes de déchets ; valeur des produits finis en termes de composition, de qualité structurelle, de rendement de récupération) ;
- sur le plan de la *flexibilité*, les auteurs classent la fusion par arc électrique comme « *la pire* » (manipulations et préparations requises), « *mauvaise* » (entrée des métaux et géométrie, taux de contaminants enlevés, propreté des produits finis), « *moyenne* » (risques de contaminations croisées).

Les auteurs concluent que « *Dans un souci de sécurité, tous les événements potentiels doivent être analysés pour l'installation, la santé des travailleurs et du public, ainsi que leur impact sur l'environnement, en fonction de leur probabilité et de leurs conséquences. Les évaluations doivent être réalisées par des experts* », ce qui interroge plus spécifiquement le statut d'ICPE retenu par EDF (*cf*. section 5).

4.2. Incertitudes radiologiques

Le risque précédent est intimement lié à la rigueur et à la qualité des contrôles de radioactivité qui devraient être instaurés non seulement aux différents points de surveillance radiologique du procédé de traitement des déchets radioactifs TFA et FMA entrants, mais également en amont du technocentre dans les installations nucléaires en cours de démantèlement.

Dans les rapports de l'ex-IRSN (aujourd'hui fusionnée avec l'ASN au sein de l'ASNR), sont rappelées les exigences d'un contrôle précis et la nécessité d'une amélioration des procédures et des méthodes de détection radiologique : « *En pratique, 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 maitrise 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* »[35].

Se pose alors aussi le problème du contrôle de l'homogénéité de la radioactivité au sein des lingots d'aciers sortant du technocentre, supposés *très très faiblement radioactifs*, mais contenant encore des concentrations non négligeables de certains radionucléides tels que le Fe-55, le Co-60, le Cs-137 et le Ni-63, comme démontré plus haut (tableau 3). Ainsi que le précise l'IRSN lors du Débat Public 5e PNGMDR en 2019, « *Pour garantir qu'un déchet est au-dessous d'un certain seuil de radioactivité, il faut pouvoir évaluer cette dernière précisément. Il faut pouvoir mesurer une radioactivité très faible sur de gros volumes de déchets. Typiquement, cela nécessite un échantillonnage, c'est-à-dire la mesure précise de la radioactivité sur un morceau extrait du déchet. Le déchet peut être inhomogène, contenant par exemple des parties plus radioactives que le reste, et une méthode d'échantillonnage*

[35] IRSN, *PNGMDR – fiche d'analyse des controverses techniques – 5. Gestion des déchets de très faible activité*, 22-10-2018. https://pngmdr.debatpublic.fr/images/contenu/documentation/clarification-controverses/Q5_IRSN.pdf.

inadaptée pourrait ne pas les identifier. Ainsi, c'est le choix des techniques de mesure et la stratégie d'échantillonnage qui sont en pratique cruciaux pour garantir l'absence de risque sanitaire. Pour qu'une libération soit possible en principe, il faudrait donc que le producteur soit capable d'effectuer la démonstration rigoureuse que l'activité de son déchet, en intégrant les incertitudes, soit bien au-dessous du seuil »[36].

En particulier, les méthodes de détection et d'analyse spectrométrique de rayonnement des radioéléments émetteurs γ (dont ceux qui émettent des rayonnements γ par désexcitation après désintégrations α et β) présents à l'intérieur des lingots sont encore insuffisamment sensibles pour parvenir à contrôler avec précision leur homogénéité de concentration, mais sont en développement, en particulier en France[37].

Les incertitudes radiologiques concernent également celles des ***effets génotoxiques des très faibles doses radiologiques***. L'étude épidémiologique INWORKS[38] menée récemment auprès de grandes cohortes de travailleurs des installations nucléaires en France, en Grande Bretagne et aux Etats-Unis confirme que l'effet des faibles doses sur l'excès de mortalité par cancer est bien proportionnel aux doses radiologiques reçues (en milligray, mGy[39]) selon une loi linéaire sans seuil (augmentation de 52 % des cancers par gray cumulé reçu sur 10 ans, résultat obtenu avec une taux de confiance de 90 %), et montre en outre que « *certaines données suggèrent une pente plus forte pour l'association dose-réponse dans la plage des faibles doses que sur l'ensemble de la plage des doses* ». Pour l'IRSN, qui a participé à l'étude, « le risque de leucémie non lymphoïde chronique augmente proportionnellement à la dose reçue, d'environ 26,8 % pour une augmentation de la dose cumulée absorbée à la moelle osseuse de 100 mGy »[40]. Les mécanismes de cancérogénèse aux faibles doses, récemment montrés par l'IRSN[41], montrent que « *en radiobiologie (…), les premiers stades de la carcinogenèse (…) montrent des réponses linéaires à des doses aussi faibles que 10 mGy* ». De plus, plusieurs études épidémiologiques ont constaté l'augmentation des leucémies autour des installations nucléaires : l'étude Geocap menée autour des 19 centrales nucléaires en France montre un risque 1,9 fois plus élevé de leucémie aiguë chez les enfants vivant à moins de 5 km d'une centrale nucléaire que pour ceux vivant au-delà de 20 km[42] ; de même, l'augmentation de 120 % des cas de leucémie et de 60 % de tous les cancers chez les nourrissons et les enfants de moins de 5 ans vivant à moins de 5 km de toutes les centrales nucléaires allemandes, observée dans l'étude KiKK en 2008, pourrait s'expliquer par une plus grande radiosensibilité des tissus hématopoïétiques chez les embryons et fœtus que chez les nouveau-nés[43]. Enfin, une étude en cours montre déjà certains effets génotoxiques des très faibles doses sur l'avifaune environnant la centrale nucléaire de Fessenheim[44].

4.3. Incertitudes géologiques

La localisation du technocentre EDF projeté sur le terrain de la centrale nucléaire de Fessenheim est sujette aux mêmes incertitudes sur les risques sismiques et d'inondation que pour la centrale elle-

[36] https://pngmdr.debatpublic.fr/approfondir/clarification-des-controverses-techniques/17-synthese/31-synthese-5-tfa-et-seuils.

[37] Arbor N., *Le suivi radiologique d'un site en démantèlement : des solutions technologiques à l'intérêt sociologique. Séminaire OHM Fessenheim*, 18-11-2022. https://ohm-fessenheim.fr/wp-content/uploads/seminaire2022_nicolasArbor_IPHC_min.pdf.

[38] Ridchardson D.B., *Cancer mortality after low dose exposure to ionising radiation in workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS): cohort study*. British Medical Journal 2023;382:e074520. https://doi.org/10.1136/bmj-2022-074520.

[39] Le gray (Gy) est l'unité physique de dose de rayonnement ionisant absorbée par la matière, équivalent à une énergie de un joule par kilogramme.

[40] IRSN, Note d'information, 30 août 2024. https://recherche-expertise.asnr.fr/sites/default/files/2024-08/IRSN_NI-FR-INWORKS_2024-08-30.pdf.

[41] Laurier D., Billarand Y, Klokov D., Leuraud K. (2023). *The scientific basis for the use of the linear no-threshold (LNT) model at low doses and dose rates in radiological protection*. J. Radiol. Prot. 43, 024003. https://doi.org/10.1088/1361-6498/acdfd7.

[42] Sermage-Faure C. et al. (2022). *Childhood leukemia around French nuclear power plants—The geocap study, 2002–2007*. Int. J. Cancer: 131, E769–E780. https://doi.org/10.1002/ijc.27425.

[43] Fairlie I. (2014). *A hypothesis to explain childhood cancers near nuclear power plants*. J. of Envir. Radioactivity 133, 10-17. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.07.024.

[44] Massemin-Challet S., del Nero M., Naja R., Boos A., Sellam A., Courson O., Criscuolo F., *Watchbirds – Étude à long-terme des conséquences du démantèlement aux environs de la centrale de Fessenheim sur des espèces d'oiseaux sentinelles*, 18 novembre 2022. https://ohm-fessenheim.fr/wp-content/uploads/seminaire_sylvieMassemin_IPHC_min.pdf.

même. Il n'est pas inutile de rappeler ici que Fessenheim se trouve sur le compartiment tectonique de l'ancien volcan du Kaiserstuhl de l'autre côté du Rhin et située à une dizaine de kilomètres d'une faille active qui a causé un séisme de magnitude 6,5-7 le 28 juin 1926, et à 30 km de la faille de la Forêt Noire qui passe par Bâle et a provoqué le séisme destructeur de magnitude 6-7 qui a ravagé Bâle et Strasbourg le 18 octobre 1356[45].

La proximité immédiate du terrain prévu pour l'implantation du technocentre vis-à-vis du Canal d'Alsace à 8 m sous le niveau de celui-ci crée donc un risque non négligeable d'inondation en cas de rupture de la digue ouest de ce canal lors d'un séisme proche du séisme majoré de sécurité, même si le rehaussement de 7 m du terrassement prévu pour l'installation du technocentre EDF peut atténuer ce risque et celui de la dispersion des matières radioactives potentiellement rassemblées dans ces installations.

5. Un statut juridique questionnable

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. C'est d'autant plus étonnant qu'EDF prévoit un partage d'une partie des installations de l'INB 75 (centrale nucléaire de Fessenheim) avec les installations prévues du technocentre qui la jouxte : « *Afin de réduire l'emprise au sol du projet Technocentre et les impacts potentiels associés, il est envisageable de mutualiser et de réemployer plusieurs bâtiments situés sur le périmètre de l'INB de Fessenheim* » (DMO du technocentre Fessenheim, p. 52).

Un statut d'**INB** (Installation Nucléaire de Base), plus exigeant, serait *a priori* préférable pour garantir la sûreté des installations, la sécurité des personnels censés œuvrer entre les déchets TFA-FMA entrants et sortants, et contrôler les méthodes utilisées pour la mesure des concentrations radioactives par radioélément dès la réception des colis et pendant toute la chaîne de traitement (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 à la découpe, au tri, à la séparation du laitier, etc.).

Avec un simple statut d'ICPE, le contrôle relève de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) qui n'a ni les compétences scientifiques (en particulier en radiologie) ni l'autorité nécessaires pour pouvoir assurer ces garanties et risque d'être très en-dessous des exigences de sûreté et de sécurité nucléaire du technocentre, comme le soulignait précédemment l'IRSN[46].

Théoriquement et juridiquement, le classement d'une installation manipulant des matériaux radioactifs en INB ou en ICPE dépend de la valeur d'une quantité appelée *coefficient Q*, défini par le Code de l'Environnement comme la somme relative des activités maximales A_i de tous les radionucléides X_i présents dans l'installation, rapportées aux valeurs de référence $A_{ref\,i}$ de chaque radionucléide données dans l'annexe 13-8 du Code de la Santé Publique (section 1), soit :

$$Q = \Sigma_i \left({A_i}/{A_{ref\,i}} \right).$$

[45] Jomard H. et al. (2017). *Transposing an active fault database into a seismic hazard fault model for nuclear facilities – Part 1: Building a database of potentially active faults (BDFA) for metropolitan France*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 17, 1573–1584. https://doi.org/10.5194/nhess-17-1573-2017.

[46] *Cf.* réf. 26.

L'article R. 593-2 du code de l'environnement prévoit ainsi de classer en INB[47] :

- les installations de préparation, d'enrichissement, de fabrication, de traitement ou d'entreposage de combustibles nucléaires, ainsi que les installations connexes de traitement ou d'entreposage des déchets qu'elles produisent, lorsque ces installations présentent un coefficient *Q* supérieur à 10^6. ***Le technocentre pourrait a priori entrer dans cette catégorie*** ;
- les autres installations de traitement ou d'entreposage de déchets radioactifs, lorsqu'elles présentent un coefficient *Q* supérieur à 10^9 ;
- les installations consacrées au stockage de déchets radioactifs, autres que celles mentionnées au 5° de l'article L. 593-2, lorsqu'elles présentent un coefficient *Q* supérieur à 10^9.

On perçoit immédiatement la difficulté technique que représente la nécessité d'une mesure rigoureuse et permanente des activités de *chaque* radionucléide entrant et présent à tout moment dans l'enceinte englobant les installations du technocentre projeté, dans laquelle des déchets FMA et TFA sont susceptibles d'arriver de toute la France (voire d'autres pays, comme l'évoque le DMO) et d'y être grenaillés, découpés, triés, fondus, coulés, stockés, etc.

Il est cependant fort probable, au vu des quantités de déchets FMA et TFA prévus pour être traités au technocentre, que le coefficient *Q* puisse dépasser largement et à de nombreux moments, voire en permanence, le seuil de 10^6 qui le concernerait logiquement, voire de celui du CSA qui est classé INB. Il serait par conséquent beaucoup plus cohérent et sûr que les mesures de l'activité de tous les radionucléides présents dans les déchets métalliques radioactifs entrant et traités dans l'enceinte du technocentre projeté soient contrôlés par l'ASNR plutôt que par la DREAL, non compétente dans ce domaine, ce qui requiert que le statut d'INB soit accordé au technocentre par principe, par cohérence et par sûreté.

6. Conclusions

Au vu des nombreuses incertitudes 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 à défaut l'installation du technocentre au CIRES 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 décision d'EDF[48], publiée le 7 juillet 2025 à la suite du débat public, est alignée avec le DMO qui avait été déposé et ne le modifie qu'à la marge et au futur :

« *EDF décide de poursuivre le projet Technocentre et prépare, dans cette perspective, les dossiers de demandes d'autorisations associées, principalement le dossier de demande d'autorisation environnementale (DDAE), le dossier de demande de dérogation prévu au code de la santé publique et la demande de permis de construire, dont les dépôts sont envisagés pour fin 2025.*
EDF poursuivra et complètera les études engagées en vue de préciser et optimiser l'impact environnemental du projet.

[47] https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000038238975/2022-03-28.
[48] https://www.debatpublic.fr/sites/default/files/2025-07/PTF-Decision-EDF.pdf.

EDF engagera un travail avec les acteurs socio-économiques locaux et les collectivités territoriales sur l'insertion du projet au bénéfice du territoire sur les thématiques de l'emploi local, de la formation, de la visibilité sur les marchés à venir, des synergies envisageables, de l'organisation du chantier et des transports.
EDF s'engage par ailleurs à mettre en place des dispositions permettant de continuer à apporter de l'information et à échanger dans la durée sur le projet et ses enjeux, au fur et à mesure de son avancement ».

Elle ne lève ni les incertitudes, ni les doutes quant à la pertinence scientifique et économique du projet, aux risques d'insuffisance de sûreté et de sécurité induits par le statut-même d'ICPE qu'EDF préfère endosser pour des installations de traitement de déchets métalliques radioactifs mêlant déchets TFA et FMA, pour un objectif économique incertain et des promesses d'emploi coûteuses, alors que la situation financière fortement déficitaire actuelle et à venir de l'entreprise publique EDF semble devoir perdurer face au mur d'investissements et de dettes engagées dans le maintien du parc nucléaire encore en service, la difficile aventure industrielle des réacteurs EPR1 et EPR2, l'incertitude technologique et économique des hypothétiques petits réacteurs SMR et le défi risqué du projet Cigéo de stockage géologique des déchets radioactifs HA-MAVL dans l'argilite entre Aube et Meuse.

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