

La gestion des déchets issus du démantèlement des installations nucléaires, une activité en croissance qui reste à optimiser

Le démantèlement des installations nucléaires mises en service dans les années 1980 et 1990 va constituer un enjeu majeur dans les vingt années à venir.

Dans ce contexte, la mission de l'Andra est de concevoir, de mettre en place et d'exploiter des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs garantissant la protection des populations et de l'environnement, à court et à long terme, tout en offrant à ses clients producteurs de déchets les meilleures conditions économiques de prise en charge.

Par **Bruno CAHEN***

LE DÉMANTÈLEMENT DES INSTALLATIONS ET LA GESTION DES DÉCHETS INDUITS : UN DÉFI INDUSTRIEL ENCADRÉ AUX NIVEAUX INTERNATIONAL ET FRANÇAIS

Le démantèlement d'une installation nucléaire recouvre l'ensemble des opérations réalisées par l'exploitant après l'arrêt définitif de celle-ci jusqu'à l'atteinte d'un état qui limite ou supprime totalement les risques que présente le site pour l'homme et l'environnement. Ainsi le démantèlement peut conduire à déséquiper et à décon-

taminer un bâtiment qui pourra être réutilisé, mais elle peut aussi aller jusqu'à la déconstruction totale du site (équipements et bâtiments). L'assainissement des terrains fait partie intégrante du démantèlement. En France, cette opération est soumise à une autorisation préalable par décret du gouvernement, pris après avis de l'Autorité de sûreté nucléaire. Le décret fixe les modalités et les caractéristiques des opérations à conduire, ainsi que l'état final du site auquel doit aboutir l'exploitant.

* Directeur Industriel, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra).

Avec quelques variantes, cette méthodologie est appliquée par l'Andra au démantèlement (moins complexe) d'installations non nucléaires contaminées par de la radioactivité naturelle (comme, par exemple, d'anciens sites de l'industrie du radium ou d'anciens ateliers ayant utilisé des minéraux contenant du thorium).

Sur le territoire français, les exploitants d'installations nucléaires ont adopté une stratégie de démantèlement dite « immédiate », un démantèlement opéré, le cas échéant, après quelques années de décroissance radioactive et permettant d'atteindre un état final des sites qui en permet la réutilisation aux fins d'un usage industriel (nucléaire ou non). C'est ainsi que les six anciens réacteurs de production d'électricité de la filière UNGG (1) (les réacteurs de Chooz A, de Brennilis et le réacteur Superphénix) sont en cours de démantèlement ; il en va de même pour une vingtaine d'installations de recherche, ainsi que d'installations de retraitement de combustibles usés. Cette stratégie dite immédiate présente l'avantage de réduire les risques de perte de compétences humaines et techniques entre la fin de l'exploitation d'une installation et son démantèlement.

Les programmes de démantèlement (déjà engagés ou à engager) reposent sur l'existence non seulement des techniques de déconstruction, mais aussi de filières de gestion des déchets, des compétences et des financements y afférant.

Certains exploitants et pays étrangers ont adopté une stratégie dite « différée ». Celle-ci permet de bénéficier plus largement de la décroissance radioactive avant d'entreprendre les opérations de démantèlement. L'inconvénient majeur de cette stratégie est le risque de perte de compétences ou de report de charges sur les générations futures, un risque qui s'accroît avec le temps. Les deux stratégies sont reconnues, au niveau international, par l'AIEA. Il en va de même pour une troisième stratégie qui est celle du confinement sûr. Celle-ci consiste, après l'arrêt de l'installation, à renforcer le confinement des substances radioactives au sein de l'installation plusieurs décennies durant, jusqu'à l'obtention d'un niveau de radioactivité résiduel suffisamment faible pour permettre de déclasser le site.

En ce qui concerne spécifiquement les réacteurs de production d'électricité, un rapport de l'Agence de l'Énergie nucléaire (OCDE/AEN) de 2003 présente un panorama des stratégies de démantèlement retenues dans les pays membres de cette organisation (2).

À ce jour, la France dispose d'un retour d'expériences de démantèlements de réacteurs conçus selon différentes technologies, d'installations de recherche, ainsi que d'installations intervenant dans le cycle du combustible, à Marcoule (dans le Gard) et à La Hague (dans le département de la Manche). La capacité de l'industrie française à démanteler des installations de complexités et de natures variables est établie. Les besoins de démantèlement du pays ont permis de développer des techniques de décontamination, de découpe, de traitement et de conditionnement de déchets

liquides et solides, des techniques et des installations d'entreposage et de stockage de déchets désormais bien maîtrisées par les industriels spécialisés. La robotique est venue compléter les compétences humaines et réduire les risques associés au démantèlement. Une bonne compréhension des phénomènes intervenant dans l'installation initiale et dans le stockage des déchets sur le long terme permet de réduire les impacts sur l'environnement, ainsi que les risques et les coûts. De nombreuses pistes de progrès restent à investiguer pour améliorer encore la performance des méthodes actuelles et pour réduire les risques et les impacts potentiels. Les principaux axes d'innovation en cours sont les techniques de décontamination (décontamination chimique, par laser, au moyen de particules ou de carboglace sous pression) et de découpe, la robotique, le traitement des déchets mixtes (à la fois radioactifs et chimiquement toxiques ou réactifs), l'amélioration des connaissances sur la spéciation et sur la migration de radionucléides dans les matériaux (notamment le béton et les métaux), le recyclage de déchets métalliques et de béton très faiblement radioactifs, la mesure et les systèmes d'information permettant d'optimiser les stratégies de démantèlement (réduction des doses reçues par les opérateurs, réduction des effluents et des déchets induits, réduction des durées et des coûts des interventions).

DES DÉCHETS DE TOUTES NATURES ET DE TOUTES DIMENSIONS ISSUS DES OPÉRATIONS DE DÉMANTÈLEMENT DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES, DONT L'ANDRA DOIT ASSURER LA GESTION INDUSTRIELLE DURABLE POUR SES CLIENTS COMME POUR LA SOCIÉTÉ DANS SON ENSEMBLE

Un volume total et un flux annuel significatifs
de déchets à faible et à très faible activité

Les déchets de démantèlement sont pour 80 % des déchets conventionnels et pour 20 % des déchets radioactifs. Ces derniers sont majoritairement de très faible et faible activité. Il s'y ajoute quelques gisements de déchets à faible activité et à vie longue (déchets de graphites, déchets contenant de l'uranium et du plutonium provenant du cycle du combustible)

(1) Uranium naturel-graphite-gaz.

(2) OCDE/AEN : Démantèlement des centrales nucléaires – Politiques, stratégies et coûts (2003).

Demi-vie Activité	Vie très courte < 100 jours		Vie courte (VC) ≤ 31 ans		Vie longue (VL) > 31 ans	
	Très faible activité (TFA)			Centre de stockage TFA en surface (Aube) En exploitation		
Faible activité (FA)	Gestion par décroissance radioactive sur le site de production puis élimination dans les filières conventionnelles		 Centre de stockage FMA-VC en surface (Aube) En exploitation		projet de stockage à faible profondeur (R&D cadrée par la loi du 28 juin 2006)	
Moyenne activité (MA)					Projet CIGEO MSI prévue en 2025	
Haute activité (HA)			stockage en couche géologique profonde (R&D cadrée par la loi du 28 juin 2006)			

Figure 1 : Filières de gestion des déchets radioactifs : filières existantes et filières à créer.

Catégories	Inventaire à fin 2010	Inventaire à fin 2020	Inventaire à fin 2030
Haute activité	2 700	4 000	5 400
Moyenne activité à vie longue	41 000	45 000	49 000
Faible activité à vie longue	87 000	89 000	133 000
Faible et moyenne activité à vie courte*	830 000	1 000 000	1 200 000
Très faible activité*	360 000	750 000	1 300 000
TOTAL	≈ 1 320 000	≈ 1 900 000	≈ 2 700 000

* Incluant les volumes déjà stockés par l'Andra (CSM, CSFMA et CSTFA).

Tableau 1 : Inventaire des déchets radioactifs en volume (m³) équivalent conditionné (valeurs arrondies) selon l'édition 2012 « Les Essentiels » de l'inventaire national publié par l'Andra.

et une petite quantité de déchets à moyenne activité et à vie longue (déchets activés, dont des pièces métalliques situées au cœur des réacteurs).

L'Inventaire national de l'Andra fournit les quantités de déchets déjà produits et les prévisions aux horizons 2020 et 2030 (déchets d'exploitation et de démantèlement). Il décrit les filières de gestion déjà opérationnelles et les filières en projet. C'est donc un outil qui permet de planifier les adaptations à apporter aux centres de stockage en exploitation et de dimensionner les futurs centres.

Les décennies 2010 et 2020 verront la production de déchets de démantèlement en des quantités supé-

rieures aux flux actuels, qui s'ajouteront aux flux de déchets récurrents des installations en exploitation, avec pour particularité d'être moins prédictibles et beaucoup plus variables tant sur le plan qualitatif que quantitatif (voir le tableau 1).

La durée d'exploitation d'une installation nucléaire influe peu sur le volume et sur le choix de la filière de gestion des déchets que son démantèlement générera, contrairement aux déchets d'exploitation qui sont peu ou prou proportionnels à cette durée. En revanche, selon la durée d'exploitation envisagée par l'exploitant, notamment pour les installations du parc nucléaire d'EDF, les chroniques de production de ces

déchets de démantèlement peuvent être très variables. La gestion de démantèlements concomitants plus nombreux que ce n'est actuellement le cas conduirait à des pics de production de déchets, et donc un besoin de sur-dimensionner les capacités annuelles d'accueil des installations de stockage ou d'entreposer ces déchets pour lisser la charge. Une stratégie industrielle de gestion des démantèlements suppose de lisser au maximum de tels pics, qui sont difficiles à gérer tant pour les moyens humains et matériels des entreprises qui assurent les opérations de démantèlement que pour les flottes de transport et les installations de stockage.

Au vu des prévisions figurant dans l'inventaire national 2012 de l'Andra, la capacité autorisée du CSFMA et la capacité prévisionnelle du stockage géologique profond Cigéo ont été adaptées. La capacité autorisée du CSTFA (650 000 m³) est insuffisante pour couvrir les besoins à moyen terme (qui sont d'environ 1 500 000 m³). *A contrario*, le volume total de déchets FAVL est limité (à 150 000 m³), ce qui rend le modèle économique du stockage FAVL délicat à construire. Pour réduire le volume total de déchets, la poursuite des efforts de réduction des déchets à la source, de leur densification, de leur stockage et du recyclage d'une partie d'entre eux constituent les trois axes de progrès partagés par les autorités, les producteurs et les gestionnaires de déchets radioactifs, en France comme à l'étranger.

Une nécessité industrielle : planifier et coordonner les opérations de démantèlement grâce à la conception et à l'exploitation des centres de l'Andra

La mission de l'Andra est de concevoir, de mettre en place et d'exploiter des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs garantissant la protection des populations et de l'environnement, à court et à long terme, tout en offrant à ses clients producteurs de déchets les meilleures conditions économiques de prise en charge. Les différentes filières ont été progressivement développées essentiellement pour les déchets radioactifs d'exploitation des installations nucléaires, de l'industrie, de la recherche et du secteur de la santé. Les déchets provenant du démantèlement d'installations et de laboratoires sont progressivement devenus une composante essentielle d'un marché appelé à se développer à l'avenir avec l'arrêt des installations électronucléaires mises en service dans les années 1980 et 1990.

Au niveau national, la loi de programme du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs a établi un cadre de travail et une structure de pilotage, avec la mise en place d'un plan

national de gestion des déchets radioactifs mis à jour tous les trois ans. La loi confie également à l'Andra la mission d'établir, avec la même périodicité, un inventaire des déchets radioactifs qui inclue les prévisions de production de déchets. Cette politique française est désormais partagée au niveau européen. La directive (3) 2011/70 Euratom du 19 juillet 2011 impose en effet aux pays membres de l'Union européenne de se doter d'outils de gestion similaires.

Plus de 90 % du volume total des déchets dont la production est prévue d'ici à 2020 disposent d'une filière de stockage opérationnelle. Les déchets de démantèlement constituent une part croissante de ces volumes. Le traitement, le conditionnement des déchets et leur évacuation doivent être réalisés au fur et à mesure de leur production.

Les déchets TFA ou FMA-VC sont accueillis dans les deux centres de traitement et de stockage qu'exploite l'Andra dans l'Est de la France : un centre de stockage dédié aux déchets à faible et moyenne activité et à vie courte (CSFMA) et un centre de stockage pour les déchets à très faible activité (CSTFA).

Les déchets FAVL ou les déchets MAVL sont entreposés dans l'attente de la mise en service industriel des filières de stockage correspondantes. L'Andra développe deux projets de stockage : un stockage géologique en couche géologique profonde pour les déchets HA et pour les déchets MAVL (il s'agit du projet de centre industriel de stockage géologique Cigéo, dont la mise en service est prévue en 2025) et un stockage à faible profondeur pour les déchets FAVL.

La planification prévisionnelle revêt une importance capitale tant pour les exploitants d'installations, qui doivent programmer leur démantèlement, que pour l'Andra, qui doit concevoir, mettre en service et exploiter les installations destinées à accueillir les déchets produits. Cette planification est réalisée à deux niveaux :

– a) au niveau **stratégique**, à travers l'inventaire national, publié tous les trois ans, qui établit des prévisions de production de déchets, dont les déchets de démantèlement, aux horizons 2020 et 2030, et jusqu'à la date de fin de démantèlement du parc actuel d'installations. L'inventaire 2012 est en cours de finalisation. Un résumé en a été publié par l'Andra en janvier 2012 (*Inventaire national des déchets et des matières radioactives édition 2012*, coll. Les Essentiels) (4).

– b) au niveau **opérationnel** : à partir des prévisions triennales établies par chaque site producteur, collectées par l'Andra et mises en regard des capacités d'ac-

(3) <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:199:0048:0056:FR:PDF>

(4) <http://www.andra.fr/download/site-principal/document/editions/450.pdf>

cueil de ses installations de traitement et de stockage, l'Andra établit le schéma directeur des constructions et de l'exploitation de ses stockages. Outre le volume, la prise en compte de la nature des déchets est importante (type d'emballage, contenu radiologique et chimique) pour optimiser la gestion des ouvrages de stockage et réduire les risques et les coûts.

Des réunions mensuelles de planification sont organisées par l'Andra avec les représentants des trois principaux producteurs de déchets radioactifs que sont Areva, le CEA et EDF afin d'ajuster leurs plannings de production, de transport, de traitement et de stockage de déchets radioactifs. L'Andra assure elle-même les prévisions et la représentation de ses autres clients producteurs de déchets (plusieurs centaines de clients produisant chacun de très faibles quantités de déchets) dans ces réunions.

Il est tout aussi essentiel qu'un producteur de déchets et l'Andra définissent conjointement les spécifications d'interface liées à son colis de déchets. La spécification de production, qui dépend du référentiel du producteur des déchets, et la spécification d'acceptation en stockage doivent être coordonnées. En outre, le producteur de déchets et l'Andra doivent intégrer mutuellement les contraintes industrielles de leur partenaire respectif dans les évolutions de leurs installations et de leurs modes opératoires. Ce développement concourant réduit les risques de surcoûts et raccourcit les délais.

Ce développement a pour objectif d'anticiper autant que possible les évolutions des référentiels des installations productrices de déchets et ceux des installations de stockage. En particulier, les spécifications de production du colis de déchets et les spécifications d'acceptation de ce colis en stockage constituent une interface critique. Cette coordination peut être relativement simple pour un déchet standard bien caractérisé et bien conditionné, mais il est plus difficile dans les cas ci-après :

- déchet insuffisamment caractérisé au regard des spécifications de l'acceptation en stockage ou de l'inventaire radiologique de ce dernier, ce qui engendre des besoins en R&D ou un surdimensionnement du colis, de l'entreposage ou du stockage afin d'assurer la sûreté de la gestion du déchet à long terme (à titre d'exemple, le gaz chlorhydrique et l'hydrogène produits par radiolyse au sein de colis de déchets anciens contenant des plastiques et des émetteurs alphas susceptibles de corroder le colis ou de constituer un mélange explosif) ;
- filière de stockage encore en cours d'étude (Cigéo, FAVL) ;
- modification de la stratégie industrielle ou des exigences applicables à l'installation génératrice du déchet ou de stockage de celui-ci. Cette situation peut apparaître à la suite d'une innovation, d'un incident ou d'un réexamen de sûreté de l'installation.

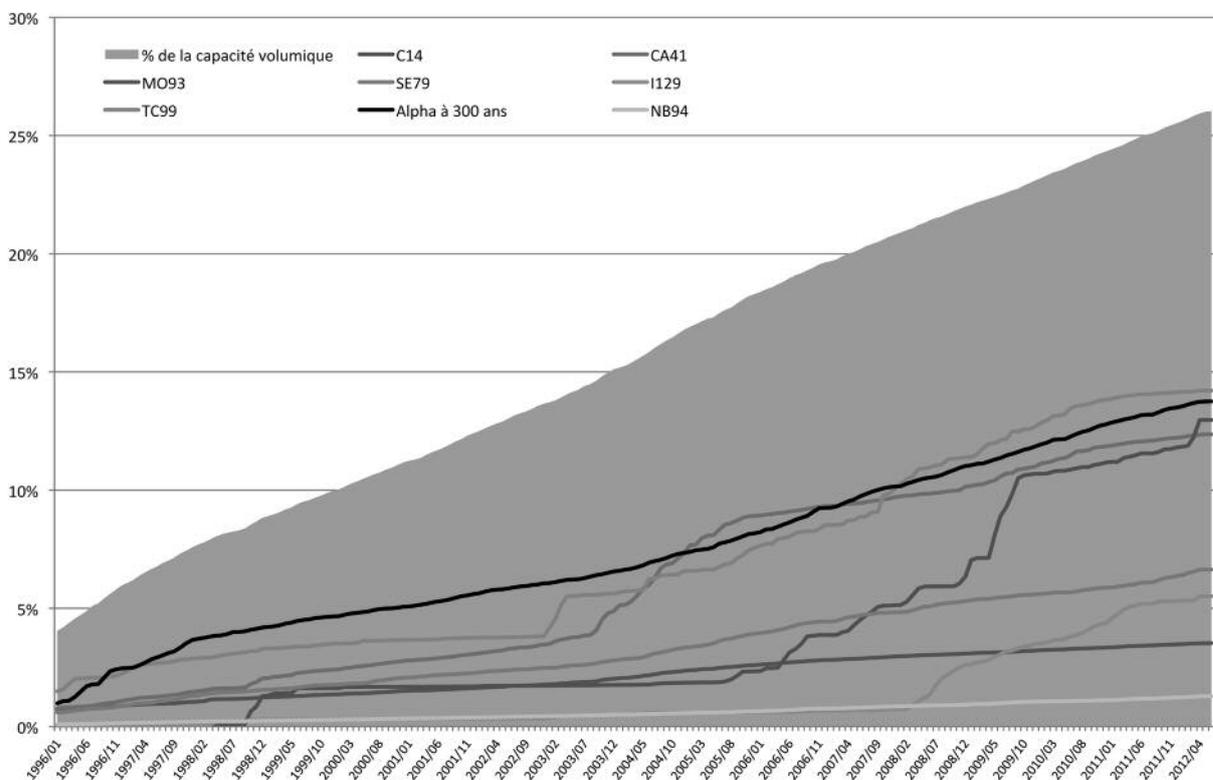


Figure 2 : Consommations comparées de capacités volumique et radiologique du CSFMA.

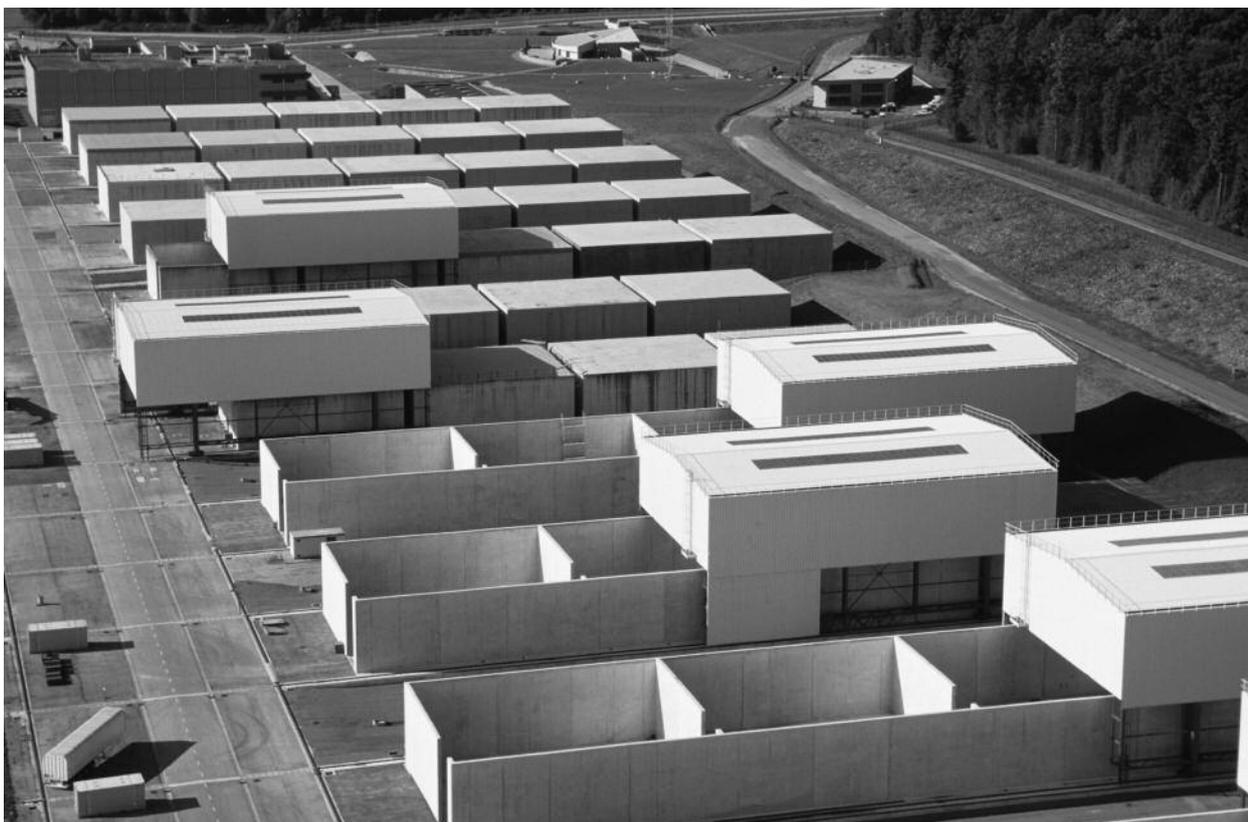


Photo 1 : Ouvrages de stockage du CSFMA.

EN FRANCE : UNE INDUSTRIE DE GESTION DES DÉCHETS DE DÉMANTÈLEMENT OPÉRATIONNELLE, MALGRÉ QUELQUES CHAÎNONS MANQUANTS

Les capacités de stockage autorisées (offrant les volumes et la capacité radiologique requis) constituent une ressource rare et très difficilement renouvelable. Il est difficile, long et coûteux d'ouvrir un nouveau centre de stockage. En lien avec ses clients, l'Andra gère cette capacité de manière prudente en pilotant les volumes et la capacité radiologique consommés. L'Andra applique la stratégie nationale de développement durable dans le souci de préserver sa capacité à offrir à ses clients un service de qualité au meilleur prix, sur plusieurs décennies.

Croissance du flux des colis « standards » de déchets (issus de démantèlements) à faible et moyenne activité et à vie courte, mais aussi de déchets de grandes dimensions présentant les mêmes caractéristiques

Les déchets de démantèlement sont conditionnés dans des caissons, dans des fûts métalliques à com-

pacter ou dans des colis prêts à être stockés dans des ouvrages en surface, au centre de stockage de l'Aube (CSFMA) (voir la photo 1 ci-dessus).

À la fin 2010, l'Andra avait stocké environ 25 % de la capacité de stockage totale autorisée (qui s'élève à un million de mètres cubes). La montée en puissance des programmes de démantèlement va non seulement accroître les flux livrés, mais également modifier les proportions des différentes géométries des colis standardisés. Il devrait y avoir ainsi, par exemple, un nombre beaucoup plus importants de caissons métalliques de 5 m³ ou de 10 m³, qui sont bien adaptés pour des déchets de formes très variées, alors que les déchets d'exploitation (résines, filtres, déchets du cycle du combustible,...) sont conditionnés dans des coques en béton et dans des fûts à compacter.

Grâce aux importants efforts faits depuis une quinzaine d'années pour réduire les quantités des déchets produits par l'exploitation des installations nucléaires et pour en améliorer le conditionnement, le CSFMA, qui a été conçu dans les années 1980 et sur la base d'une capacité annuelle de 30 000 m³, est suffisamment dimensionné pour lui permettre d'accueillir les déchets provenant de démantèlements supplémentaires.

Dès le milieu des années 1990, l'optimisation de la radioprotection et des coûts de démantèlement a conduit à étudier la possibilité de stocker des pièces massives sans qu'il soit nécessaire de les découper pour

pouvoir les conditionner dans des colis standards. Outre les gains économique et temporel qu'elles procurent, ces opérations évitées sur les chantiers réduisent d'autant l'exposition des travailleurs à des rayonnements ionisants.

La pertinence d'un stockage direct par rapport à un conditionnement en colis standards doit cependant être appréciée pour chaque objet, en examinant si elle est globalement optimale du point de vue des opérations de démantèlement (complexité des opérations de découpe, dosimétrie), de transport et de stockage

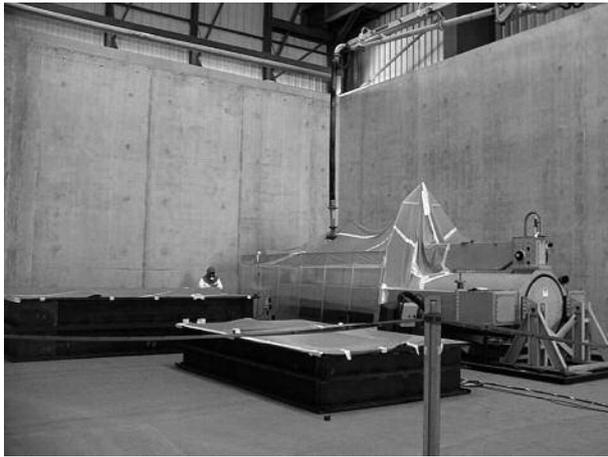


Photo 2 : Stockage en ouvrage standard d'un télémanipulateur (8 m, 20 tonnes).



Photo 3 : Stockage en ouvrage dédié d'un couvercle de cuve de réacteur à eau sous pression (90 à 120 tonnes).

(foisonnement des déchets lors de la découpe et consommation de la capacité du centre).

En réponse à la demande de ses clients, l'Andra a adapté son outil industriel pour pouvoir stocker directement des colis hors normes dimensionnelles (tels que des couvercles de cuves de réacteurs, des télémanipulateurs, des protections neutroniques de Superphénix,...) soit dans des ouvrages standards, soit dans des ouvrages développés spécifiquement et dotés de moyens de manutention et de conditionnement

adaptés (pont de 150 tonnes, équipement d'injection dans l'ouvrage).

D'autres développements sont actuellement à l'étude en vue du stockage direct de la cuve de réacteurs de Chooz A, de réacteurs de sous-marins ou d'emballages de transport déclassés. Là encore, une concertation étroite entre l'Andra et les producteurs de déchets tenant compte des responsabilités respectives des différents acteurs est nécessaire. La manière de gérer ces déchets de grande taille pourra également être discutée dans un cadre international afin de partager les retours d'expérience.

Avec l'AEN et l'AIEA, l'Andra et les producteurs de déchets participent à la construction des référentiels internationaux concernant ce domaine.

Les déchets de très faible activité

Le CSTFA, qui a été mis en service en octobre 2003, a été conçu pour permettre la prise en charge de déchets de démantèlement, jusqu'à l'horizon 2030, en fonction du cadre réglementaire applicable en France définissant le zonage déchets dans les installations nucléaires (arrêté du 30 décembre 1999, intégré en 2012 dans un arrêté interministériel plus général sur les INB). Compte tenu des principes retenus pour élaborer le zonage déchets, la radioactivité est seulement potentielle pour une partie significative du tonnage des déchets stockés au CSTFA (5) : près d'un tiers des déchets sont déclarés avec une activité massique inférieure à un becquerel par gramme.

Le stockage des déchets a lieu dans des alvéoles creusées dans une argile peu perméable qui assure leur confinement à long terme. Le fond et les parois de ces alvéoles sont tapissés avec une membrane étanche. Les déchets (pièces unitaires, GRVS (6), caissons, fûts) sont déposés dans les alvéoles et sont protégés des intempéries par une toiture mobile. Les alvéoles sont ensuite remblayées avec du sable et fermées au moyen d'une membrane. Elles sont ensuite recouvertes d'argile. Un puits de visite dans l'alvéole permet de détecter d'éventuelles infiltrations d'eau.

Comme pour le CSFMA, le stockage direct des déchets de grande dimension est possible en alvéo-

(5) L'arrêté du 31 décembre 1999 impose la mise en place d'un zonage déchets à l'intérieur des installations nucléaires de base. Fondé sur la conception, les modalités d'exploitation et l'historique de l'installation, ce zonage distingue les zones à déchets nucléaires (où les déchets sont ou peuvent être contaminés ou activés) des zones à déchets conventionnels, où il ne peut pas y avoir ni contamination ni activation des déchets. Les déchets nucléaires doivent être orientés vers une filière de gestion à traçabilité renforcée, indépendamment de leur activité.

(6) Grand récipient vrac solide (big bag).



Photo 4 : Stockage des déchets TFA.



Photo 5 : Fermeture d'alvéole et déplacement de la toiture mobile.

le standard. En 2012, l'Andra stockera ainsi deux générateurs de vapeur de Chooz A, avec des modalités adaptées aux contraintes de planning d'EDF. L'Andra étudie la création d'une alvéole dédiée à

ces déchets, qui accroîtra la capacité d'accueil globale.

Des optimisations ont été réalisées, d'autres sont en cours pour répondre à des besoins en forte crois-

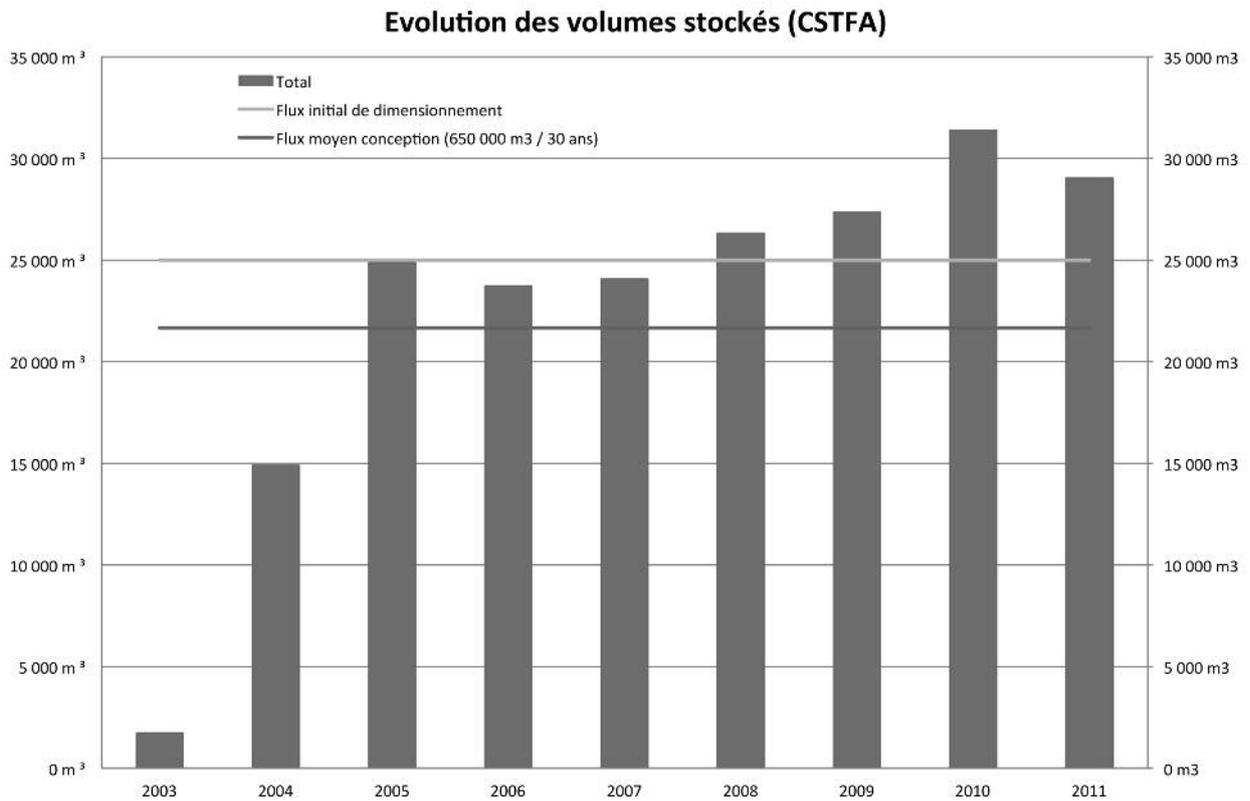


Figure 3 : Évolution des volumes stockés - CSTFA (en m³).

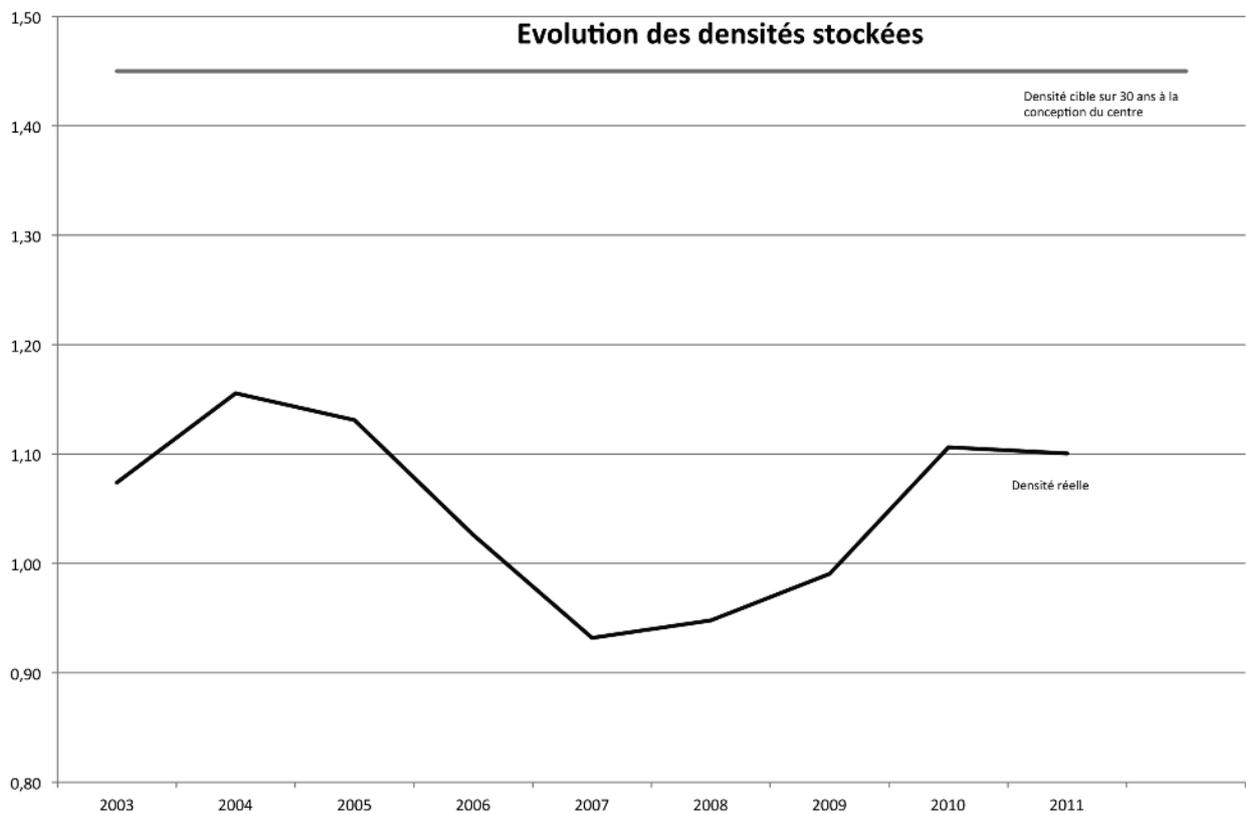


Figure 4 : Évolution des densités stockées (en m³).

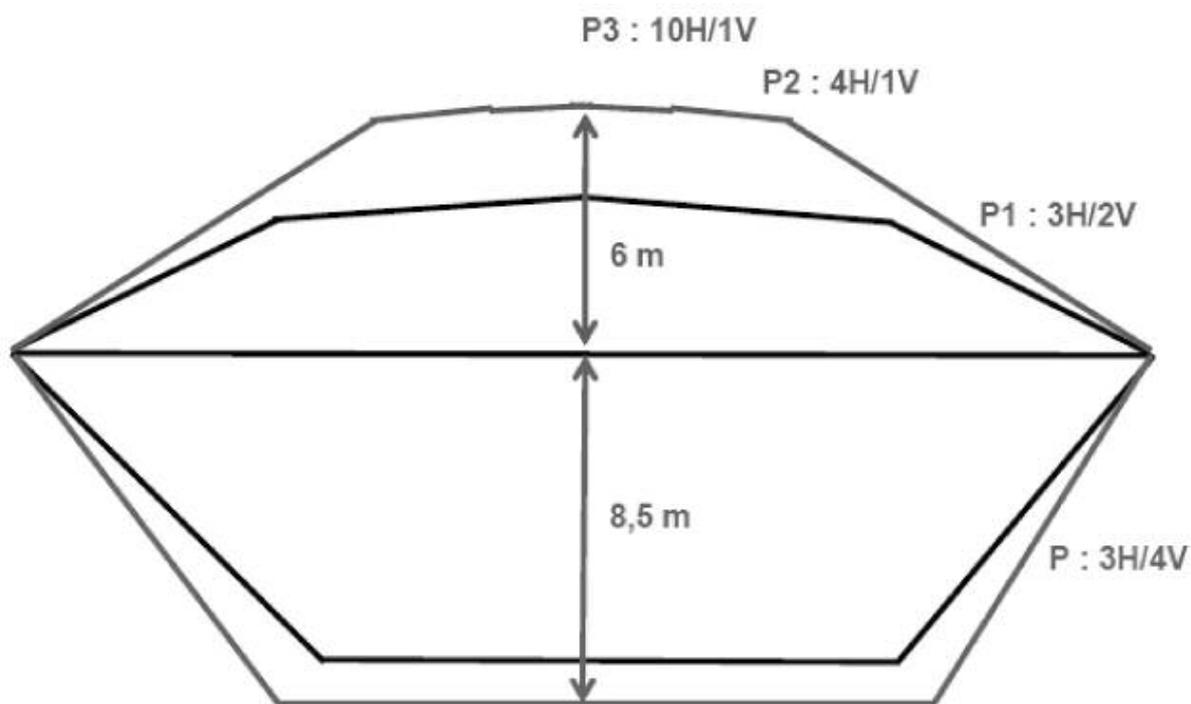


Figure 5 : Alvéole optimisée recyclée ou GNT.



Photo 6 : Vides remplis de béton.

sance et au problème que pose une densité des déchets encore trop faible.

À la fin 2011, le volume stocké au CSTFA était de 203 400 m³, soit 31 % de la capacité autorisée (650 000 m³). Le flux de conception était de 24 000

m³. Les besoins croissants des producteurs ont conduit l'Andra à optimiser l'emprise du stockage, à augmenter la compacité du stockage de 41 % (alvéoles doubles, approfondies, de pentes plus fortes) et à en modifier le mode d'exploitation pour offrir une capa-



Photo 7 : Balle sortant de la presse du CSTFA.



Photo 8 : Déchets agencés sur site.

cité de 35 000 m³ par an. D'autres pistes sont à l'étude : l'optimisation des dômes (+11 %), le recyclage des déchets de béton concassés stockables en vrac et permettant de combler les vides du stockage (économie de 7 % de volume, avec un gisement de 64 000 tonnes valorisables), ou stockables sur le site producteur.

En outre, des actions en lien avec les chantiers de démantèlement permettent d'accroître la densité des déchets. L'agencement des déchets, sur les chantiers comme au CSTFA, une meilleure utilisation des presses de l'Andra et une nouvelle déchiqueteuse, au CEA, ont permis de faire repartir à la hausse la densité des déchets (voir la figure 4 : densité 1,1 en 2011), mais la densité moyenne des déchets livrés depuis l'ouverture (0,95) reste très inférieure à l'inventaire de référence. Des pistes complémentaires sont à l'étude (presse-cisaille pour déchets métalliques, broyage et compactage de plastiques et de bois, filtres-presses pour les boues).

Environ 1 000 m³/an de déchets livrés sont incinérables, ce qui pourrait conduire à un facteur 7 de réduction de leur volume, mais le bilan économique est très défavorable. L'incinération à Centraco (7) coûte environ trente fois plus cher que le stockage au CSTFA. Les incinérateurs de déchets banals ou dangereux (300-500 €/t environ), bien que techniquement adaptés ne sont pas autorisés à traiter des déchets, même très faiblement radioactifs.

Les déchets métalliques (25 à 30 % des déchets livrés) constituent le principal gisement de déchets densifiables. Leur flux prévisionnel représente en effet près de la moitié de la capacité de stockage, en raison de leur faible densité. Une partie est recyclable, notamment les métaux qui ne sont pas contaminés ou qui pourraient être facilement décontaminés. La valorisation de ces métaux permettrait d'économiser des volumes de stockage précieux tout en répondant à des objectifs de développement durable.

Une installation de densification, mobile ou fixe, est potentiellement intéressante, mais elle présente des inconvénients et des incertitudes (disponibilité du gisement, gains réels, reprise de charge, risques). Le bilan coût/avantages reste à confirmer.

(7) Filiale d'EDF exploitant un incinérateur de déchets INB, à l'arrêt depuis septembre 2011.

(8) Jusqu'à l'accident de septembre 2011 sur son four de fusion, qui a conduit à son arrêt, Centraco fondait des déchets FA (1 500 tonnes par an) et en recyclait 55 tonnes par an. Le coût était trop élevé, pour des déchets TFA.



Photo 9 : Four de fusion (Studsvik).



Photo 10 : Virole en métal recyclé (Socodei).

Un procédé de fusion, qui suppose un découpage et un tri préalable des déchets, permettrait de densifier les déchets d'un facteur 6, voire d'en recycler une partie sous la forme d'emballages de déchets à faible et à moyenne activité (8).

En application du plan national de gestion des matières et déchets radioactifs publié par l'Etat, Areva, le CEA, EDF et l'Andra ont étudié l'intérêt d'une telle filière pour des déchets TFA et présenté les résultats de leur étude en février 2012. Le gisement recyclable en conteneur fonte est de quelques milliers de tonnes par an. Une fonderie dédiée est industriellement réalisable et économiquement viable sous certaines conditions. En particulier, les modifications nécessaires pour rendre ces conteneurs utilisables tant chez les producteurs de déchets qu'au CSFMA ne sont pas démontrées. Sous réserve de faisabilité, le coût de ces modifications pourrait compromettre la viabilité écono-

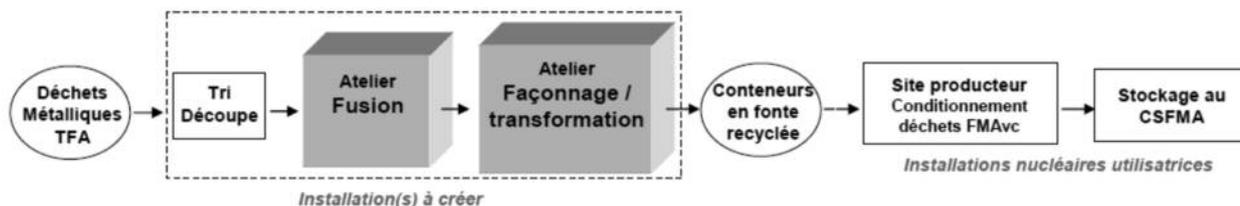
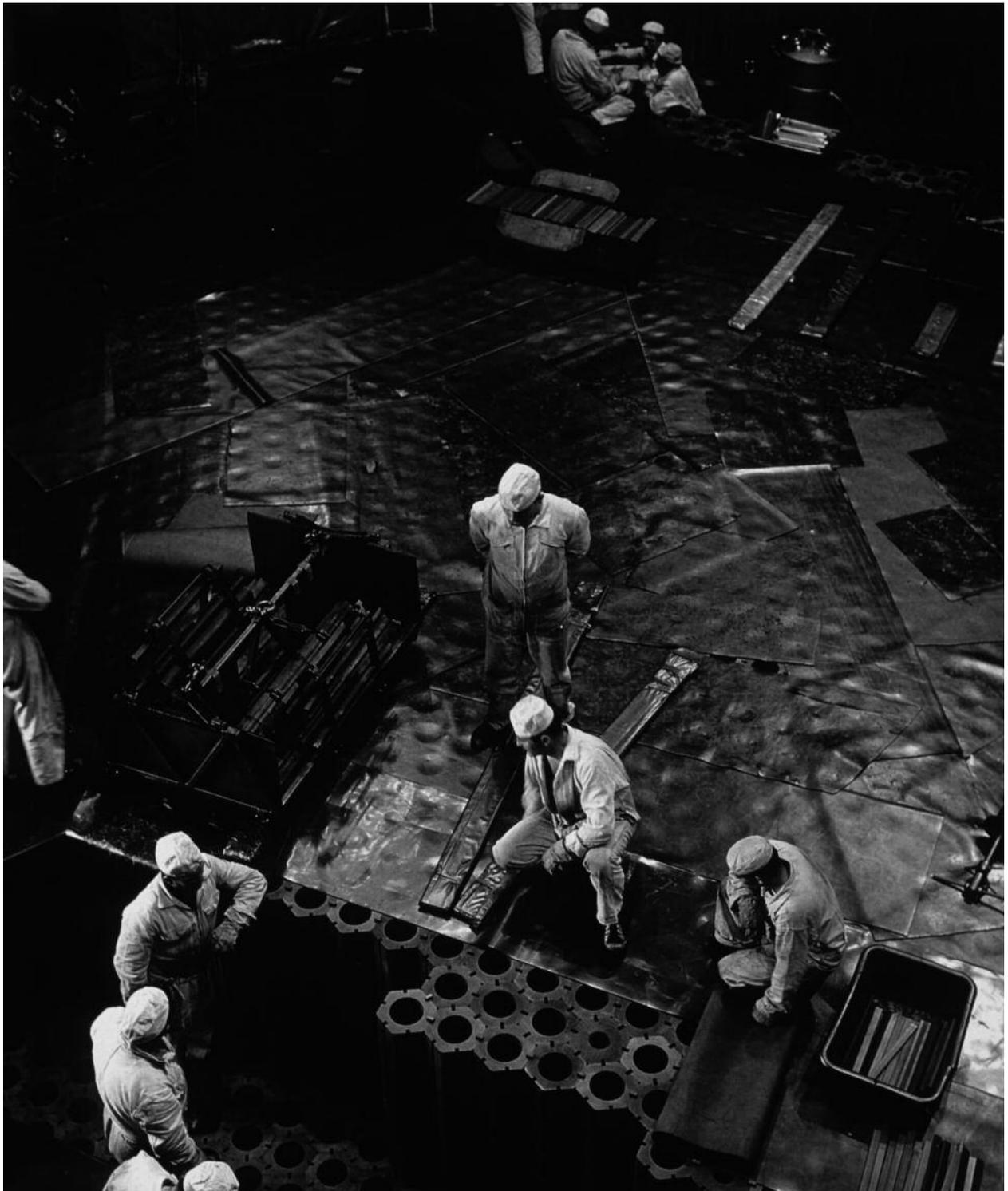


Figure 6 : Schéma de principe du recyclage de métaux en conteneurs.



(Source : EDF)

Figure 11 : Mise en place des empilements de graphite lors de la construction d'une centrale UNGG.

mique du recyclage, dont le schéma industriel de principe est décrit ci-après (voir la figure 6).

Les déchets à haute activité (HA)
ou à moyenne activité et à vie longue (MAVL)

Les déchets HA-MAVL seront produits en quantités relativement limitées par les chantiers de démantèle-

ment (il s'agit pour l'essentiel de pièces activées dans les réacteurs). Ils sont destinés à être stockés dans des formations géologiques profondes et seront conditionnés et entreposés, jusqu'à leur mise en stockage, notamment dans l'installation d'entreposage « ICEDA » qu'EDF est en train de construire. Les spécifications de conditionnement en vue du stockage donnent lieu à un dialogue entre l'Andra et les producteurs de déchets, sous l'égide de l'Autorité de sûreté nucléaire.

Les déchets FAVL

L'essentiel des déchets à faible activité issus de démantèlements sont des éléments en graphite du cœur des réacteurs de la filière uranium naturel/graphite/gaz (UNGG), représentant 24 000 tonnes. La majeure partie ne peut pas être stockée en surface compte tenu de leur contenu en carbone 14 (dont la période radioactive est de 5 730 ans) et en chlore 36 (dont la période radioactive est de 302 000 ans) sous une forme chimique risquant de migrer, dans les conditions du stockage.

Une fois conditionnés dans des colis en béton prêts au stockage, ils représenteront environ un volume de 100 000 m³. L'essentiel de ce volume (82 %) proviendra du démantèlement des empilements de graphite des réacteurs (voir la figure 2). Le reste (18 %) correspond à des déchets d'exploitation : les chemises de graphite à l'intérieur desquelles se trouvaient les éléments combustibles. Ces chemises sont actuellement entreposées sur les sites de Saint-Laurent-des-Eaux (Loir-et-Cher), de Marcoule et de La Hague.

Les producteurs de déchets et l'Andra étudient conjointement différents scénarios de gestion pour ce qui concerne les déchets FAVL. En particulier, le CEA, EDF et l'Andra ont établi un programme de R&D afin d'évaluer les possibilités de traitement des déchets de graphite permettant d'extraire et de concentrer la majeure partie du chlore 36 et du carbone 14 qu'ils contiennent. Dans le cadre du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs, l'Andra remettra un rapport, fin 2012, portant sur les différents scénarios de gestion étudiés avec les producteurs de déchets, ainsi que sur les orientations proposées pour la suite du projet.

LE DÉFI DE LA REPRISE ET DU CONDITIONNEMENT (RCD) DES DÉCHETS RADIOACTIFS ANCIENS EN VUE DE LEUR STOCKAGE DÉFINITIF, OU COMMENT TRANSFORMER LE POIDS DU PASSÉ EN INNOVATION ?

Compte tenu de l'âge des installations et de l'impératif calendaire, le défi consiste à reprendre ces déchets, à les conditionner dans un emballage transportable et, selon les caractéristiques du déchet, à les stocker au CSFMA ou à les entreposer jusqu'à leur stockage dans l'installation Cigéo, à partir de 2025. Dans le second cas, il s'agit de minimiser le risque de dégradation de l'emballage dans l'intervalle entre le conditionnement et le stockage, ou le risque d'incompatibilités entre les diverses spécifications d'acceptation (pour l'entreposage, le transport et, enfin, le stockage).

En outre, la loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs fait obligation aux responsables de déchets de type MAVL produits avant 2015 de les conditionner avant 2030.

Or, bien souvent, les paramètres archivés lors de la production des déchets, voilà de cela plusieurs décennies, sont en décalage avec les besoins de connaissance qui seraient nécessaires pour une reprise à coûts et à risques maîtrisés et pour un conditionnement optimisé. Les paramètres importants sont le spectre radiologique, les caractéristiques physico-chimiques du déchet dont la connaissance permet d'en maîtriser le comportement intrinsèque, et l'évolution en entreposage ou en stockage tant à court qu'à long terme (corrosion, gonflement, dégazage, ...).

Ces opérations nécessitent par conséquent des analyses et des développements spécifiques synonymes de délais et de coûts, mais parfois aussi porteurs d'innovations majeures (robotique, techniques de décolmatage et de décontamination, mesures *in situ* de radionucléides et techniques de conditionnement en ligne). Pour les déchets en vrac entreposés dans des fosses ou dans des cuves, outre les difficultés inhérentes aux opérations de récupération, la caractérisation et le conditionnement de ces déchets, optimisés pour orienter chaque déchet vers la filière de stockage idoine, soulèvent deux difficultés : celle de caractériser des déchets hétérogènes et anciens, et celle de conditionner *in situ* ces déchets dans des emballages qui soient compatibles avec les modes de transport, puis de stockage définitif (après une entreposage d'attente, le cas échéant). Or, ces déchets peuvent être pâteux, avec un surnageant, pulvérulents (diatomées, sels), potentiellement réactifs (magnésiens) ou dégazants à long terme (gaz de radiolyse).

Pour les déchets déjà conditionnés et entreposés dans des installations vieillissantes, l'enjeu, outre la maintenance de colis parfois dégradés, est de définir avec l'Andra la caractérisation nécessaire avant et après reprise, pour limiter les risques, le nombre d'opérations à entreprendre jusqu'au stockage et le volume de déchets à stocker. Le plus gros volume de déchets de ce type est constitué d'environ 60 000 fûts d'enrobé bitumineux entreposés au CEA, à Marcoule, dont une partie a déjà été reconditionnée dans de nouveaux fûts. Selon leurs caractéristiques, ces déchets ont vocation à être stockés au CSFMA, dans un futur centre de stockage à faible profondeur « FAVL » ou dans le futur centre Cigéo. L'orientation de ces déchets vers l'une ou l'autre de ces trois filières fait l'objet d'études menées conjointement par le CEA et l'Andra.

UNE PISTE PROMETTEUSE : L'OPTIMISATION « CYCLE DE VIE » DU DÉMANTÈLEMENT, DE LA CONCEPTION DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES JUSQU'AU STOCKAGE DE LEURS DÉCHETS ULTIMES

Pour les installations nucléaires futures, on pourrait imaginer une éco-conception concernant les déchets.

C'est ce à quoi la réglementation issue de la loi trans-
parence et sûreté nucléaire du 16 juin 2006 invite les
exploitants d'installations nucléaires.

Au-delà des exemples positifs de la coopération entre
l'Andra et les producteurs pour la gestion des déchets
de grandes dimensions et pour densifier les déchets et
le stockage TFA, une plus grande intégration de la
gestion des déchets, en amont, lors de la conception
des installations nucléaires apporterait des avantages
techniques et économiques aux exploitants de ces ins-
tallations :

- intégration des opérations de démantèlement dès la
conception des installations du futur (zonage déchets,
infrastructures et génie civil permettant le démontage
aisé des composants et un recyclage optimal des
déchets conventionnels,...) ;

- minimisation des déchets induits, avec deux volets :
le choix de matériaux minimisant les produits d'acti-
vation à vie longue (les isotopes chlore 36, calcium 41,
niobium 94, molybdène 93,...), de composants et de
surfaces facilement décontaminables pour réduire le
volume des déchets induits, mais aussi faciliter et accé-
lérer les opérations de démantèlement et réduire la
dose des radiations pour les intervenants.

Par ailleurs, le fait d'associer les acteurs de la chaîne
industrielle, du transport et de la gestion des déchets
radioactifs à la définition de la stratégie de démantèle-
ment permettrait d'améliorer les interfaces entre la
déconstruction, les opérations de tri/traitement/
conditionnement des déchets et de stockage. Cette
approche limiterait les risques d'incohérence dans les
spécifications ou dans les chroniques de livraison entre
les déchets produits et les spécifications de leur accep-
tation en stockage. À ce titre, l'Andra promeut auprès
de ses clients le développement d'une ingénierie
concourante entre exploitants, démantelers de sites,
transporteurs et industriels du traitement des déchets
radioactifs dans leurs programmes de démantèlement.
Dans les deux cas, l'objectif est de s'accorder pour faire
converger les stratégies du producteur du déchet et de
l'Andra avec celles des opérateurs intermédiaires : spé-
cifier les interfaces « colis », définir des points d'arrêt
aux jalons critiques, identifiés en commun, du déman-
tèlement et des installations de stockage.

CONCLUSION

En France, comme dans le cadre international de
l'AIEA, le démantèlement des installations nucléaires
est un enjeu majeur pour les vingt années à venir et est
à l'origine d'une filière industrielle *ad hoc* encore

jeune. L'industrie française est très bien positionnée
sur ce marché d'avenir.

En France, la majeure partie des déchets de démantè-
lement sont conditionnés et stockés au fur et à mesu-
re de leur production dans les deux centres de stocka-
ge de surface exploités par l'Andra, dont l'adaptabilité
a permis d'accroître tant les flux d'accueil que la varié-
té des déchets acceptables. Pour ces déchets représen-
tant l'essentiel du volume, les pistes de progrès envi-
sagées sont la poursuite de la réduction des volumes à
la source, la densification et, dans le cadre de la stra-
tégie de développement durable, le recyclage dans
l'industrie nucléaire de certains déchets métalliques
très peu contaminés.

Pour les déchets de graphite des réacteurs UNGG et
pour les pièces activées ne disposant pas encore
d'une solution de stockage, les producteurs de
déchets et l'Andra examinent ensemble les procédés
de traitement et de conditionnement permettant de
réduire les volumes, les risques et les coûts de leur
stockage, en parallèle au développement de projets
de création de nouvelles filières pour la gestion de
ces déchets.

La gestion des stockages en tant que ressource rare
pousse à optimiser les volumes des déchets de déman-
tèlement dans une double logique de « cycle de vie des
installations de recyclage » et de « cycle de vie du
matériau-déchet : du matériau sur pied dans l'installa-
tion nucléaire de base (INB) jusqu'au colis ultime des
déchets stocké ». Cette industrie recèle encore des
marges de progrès et d'innovation, réalisables notam-
ment en intégrant l'ensemble des acteurs industriels
intervenants, depuis la conception des installations
jusqu'au stockage des déchets induits par celles-ci.

À ce titre, il existe en France des exemples pionniers
de cette optimisation dans une logique de cycle indus-
triel intégré : décontamination de pièces de grandes
dimensions en vue de leur stockage, définition
conjointe, dès la conception d'un réacteur, d'une stra-
tégie de caractérisation de déchets à la source et en
exploitation, optimisation de la gestion des déchets
tritiiés résultant du démantèlement du futur réacteur
international ITER (conditionnement, entreposage et
stockage).

L'équilibre n'est jamais simple à définir, en raison de
la multitude des paramètres entrant dans la concep-
tion d'une installation nucléaire. La sûreté et la per-
formance industrielle restent des éléments incontour-
nables. Ce difficile exercice d'optimisation est
d'autant plus délicat que les techniques et la régle-
mentation applicables peuvent évoluer d'ici au
démantèlement des nouvelles installations et au stoc-
kage des déchets induits par celles-ci.