

La gestion des déchets issus du démantèlement des installations nucléaires, une activité en croissance qui reste à optimiser¹

Bruno Cahen

Le démantèlement d'une installation nucléaire est l'ensemble des opérations réalisées par l'exploitant après l'arrêt définitif, jusqu'à l'atteinte d'un état qui limite ou supprime totalement les risques présentés par le site pour l'homme et l'environnement. Ainsi le démantèlement peut conduire à déséquiper et décontaminer un bâtiment qui sera réutilisable, mais aussi aller jusqu'à la déconstruction totale des équipements et bâtiments. L'assainissement des terrains fait partie intégrante du démantèlement. En France, le démantèlement est soumis à autorisation préalable par décret du gouvernement, après avis de l'Autorité de sûreté nucléaire. Le décret fixe les modalités et caractéristiques des opérations à conduire et l'état final à obtenir par l'exploitant.

1. Le démantèlement des installations et la gestion des déchets induits : un défi industriel encadré au niveau international et français.

Avec quelques variantes, la méthodologie décrite dans l'introduction est appliquée par l'Andra pour des installations non nucléaires, moins complexes, qui ont été contaminées par de la radioactivité naturelle (ancienne industrie du radium ou atelier utilisant des minéraux contenant du thorium par exemple).

Les exploitants nucléaires sur le sol français ont adopté une stratégie de démantèlement dit «immédiat», après quelques années de décroissance radioactive le cas échéant et un état final permettant la réutilisation des sites pour un usage industriel, nucléaire ou non.

Ainsi, les six anciens réacteurs de production d'électricité de la filière «UNGG²», les réacteurs de Chooz A, de Brennilis et le réacteur Superphénix sont en démantèlement, ainsi qu'une vingtaine d'installations de recherche et d'installations de retraitement de combustibles usés. Cette stratégie «immédiate» présente l'avantage de réduire les risques de pertes de compétences humaines et techniques entre la fin d'exploitation et le démantèlement. Les programmes de démantèlement déjà engagés ou à engager reposent sur la disponibilité de techniques de déconstruction, mais aussi de filières de gestion de déchets, des compétences et financements y afférents.

Certains exploitants et pays étrangers ont adopté une stratégie dite «différée». Cette stratégie permet de bénéficier plus largement de la décroissance radioactive avant de mener les opérations de démantèlement.

1. Cet article a déjà fait l'objet d'une publication dans les *Annales des Mines*.

2. Uranium naturel graphite gaz.

L'inconvénient majeur est le risque de perte de compétence, ou de report des charges vers les générations futures, qui s'accroît avec le temps. Les deux stratégies sont reconnues au niveau international, par l'AIEA. Une troisième stratégie reconnue par l'AIEA est le confinement sûr, qui consiste, après l'arrêt de l'installation, à renforcer le confinement des substances radioactives au sein de l'installation pendant plusieurs décennies, jusqu'à un niveau résiduel suffisamment faible pour déclasser le site.

Concernant 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 membres³.

À ce jour, la France dispose d'un retour d'expérience de démantèlement de réacteurs de différentes technologies, d'installations de recherche, d'installations du cycle du combustible à Marcoule et la Hague. La capacité industrielle française à démanteler des installations de complexité et nature variables est établie. Les besoins de démantèlement ont permis de développer des techniques de décontamination, découpe, traitement et conditionnement de déchets liquides et solides, des techniques et 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. La compréhension des phénomènes, dans l'installation initiale et en stockage à long terme, permet de réduire les impacts, risques et coûts.

De nombreuses pistes de progrès restent à investiguer pour améliorer encore la performance des méthodes actuelles et réduire les risques et impacts. Les principaux axes d'innovation en cours sont les techniques de décontamination (chimique, laser, particules ou carboglace sous pression) et de découpe, la robotique, le traitement des déchets mixtes (radioactifs et chimiquement toxiques ou réactifs), l'amélioration des connaissances sur la spéciation et la migration de radionucléides

dans les matériaux (bétons, métaux), le recyclage de déchets métalliques et bétons très faiblement radioactifs, la mesure et les systèmes d'information pour optimiser les stratégies de démantèlement (réduction des doses, effluents et déchets induits, des durées et coûts)

2. Des déchets de toutes natures et 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

A) Les déchets de démantèlement : un volume total et un flux annuel significatifs de déchets de faible et très faible activité

Les déchets de démantèlement sont à 80% des déchets conventionnels et à 20% des déchets radioactifs. Ces derniers sont majoritairement de très faible et faible activité, auxquels s'ajoutent quelques gisements de déchets de faible activité à vie longue (déchets de graphites, déchets contenant de l'uranium et du plutonium provenant du cycle du combustible) et une petite quantité de déchets de moyenne activité à vie longue (déchets activés, notamment pièces métalliques situées au cœur des réacteurs).

L'Inventaire national fournit les quantités de déchets déjà produits et les prévisions à l'horizon 2020 et 2030 (déchets d'exploitation et de démantèlement). Il décrit les filières de gestion opérationnelles et celles en projet. C'est donc un outil de planification des adaptations à apporter aux centres de stockage en exploitation et du dimensionnement des centres futurs.

Les années 2010 et 2020 verront la production de déchets de démantèlement en quantités supérieures aux flux actuels, qui s'ajouteront aux flux de déchets récurrents des installations en exploitation, avec la particularité d'être moins prédictibles et beaucoup plus variables, en nature comme en quantité.

La durée d'exploitation d'une installation nucléaire influe peu sur le volume et la filière de gestion des déchets que générera son

3. 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)	Gestion par décroissance radioactive sur le site de production puis élimination dans les filières conventionnelles	Centre de stockage TFA en surface (Aube) En exploitation 	
Faible activité (FA)			Projet de stockage à faible profondeur (R&D cadrée par la loi du 28 juin 2006)
Moyenne activité (MA)		Centre de stockage FMA-VC en surface (Aube) En exploitation	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.

démantèlement, 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 d'EDF, les chroniques de production de ces déchets de démantèlement peuvent être très variables. La gestion de démantèlements concomitants plus nombreux qu'actuellement conduirait à des pics de productions de déchets, et donc à un besoin de surdimensionner les capacités annuelles d'accueil des installa-

tions 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, difficile 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, la capacité autorisée du CSFMA et la capacité prévisionnelle du stockage géologique profond CIGEO sont

Tableau 1			
Inventaire des déchets radioactifs en volume (m³) équivalent conditionné (valeurs arrondies) selon l'édition 2012 <i>Les Essentiels</i> de l'Inventaire national publié par l'Andra			
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).

adaptées. La capacité autorisée du CSTFA (650 000 m³) est insuffisante pour couvrir les besoins à moyen terme (environ 1 500 000 m³). *A contrario*, le volume total de déchets FAVL est limité (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 à la source, de densification des déchets comme du stockage et le recyclage d'une partie des déchets constituent les trois axes de progrès partagés par les autorités, les producteurs et les gestionnaires de déchets radioactifs, en France comme à l'étranger.

B) Planifier et coordonner les opérations de démantèlement avec la conception et l'exploitation des centres de l'Andra : une nécessité industrielle

La mission de l'Andra est de concevoir, mettre en place et 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, en offrant à ses clients producteurs de déchets les meilleures conditions économiques de prise en charge. Les filières ont été progressivement développées essentiellement pour les déchets 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 laboratoires sont progressivement devenues une composante essentielle du marché, qui va se développer à l'avenir, avec l'arrêt des installations 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 à la même périodicité un inventaire des déchets radioactifs qui inclut les prévisions de production de déchets. Cette politique française est désormais partagée au niveau

européen. La directive⁴ 2011/70 Euratom du 19 juillet 2011 impose aux pays membres de se doter d'outils de gestion similaires.

Plus de 90 % du volume total de déchets dont la production est prévue d'ici 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 stockage que l'Andra exploite dans l'est de la France : un centre de stockage dédié aux déchets de faible et moyenne à vie courte (CSFMA) et un centre de stockage pour les déchets de très faible activité (CSTFA).

Les déchets FAVL ou MAVL sont entreposés dans l'attente de la mise en service industriel des filières de stockages correspondantes. L'Andra développe deux projets de stockages : un stockage géologique en couche géologique profonde pour les déchets HA et MAVL (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 (voir encadré p. 45).

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 qui en sont issus. Cette planification est réalisée à deux niveaux :

– **Stratégique**, à travers l'inventaire national, publié tous les trois ans, qui établit des prévisions de production de déchets, dont les déchets de démantèlement, à horizon 2020, 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 a été publié par l'Andra en janvier 2012. (Inventaire national des déchets et des matières radioactives, édition 2012, *Les Essentiels*⁵).

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

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

Le projet de stockage profond des déchets radioactifs Cigéo ou comment gérer à long terme les déchets hautement radioactifs pour ne pas reporter cette responsabilité sur les générations futures

L'Andra stocke déjà, en toute sécurité dans des installations de surface situées dans l'Aube et dans la Manche, 90 % des déchets radioactifs français produits chaque année par les centrales nucléaires, mais également par les industries de la santé, de la défense et de la recherche. Ces déchets peuvent être stockés en surface car ils ont un niveau de radioactivité compatible avec le stockage en surface ou une durée de vie courte : on peut considérer que ces installations de surface suffisent pour protéger l'homme et l'environnement tant qu'ils restent dangereux.

En revanche, les déchets dits de haute activité et de moyenne activité à vie longue, provenant majoritairement de l'industrie électronucléaire dont la période de dangerosité peut dépasser plusieurs centaines de milliers d'années, ne peuvent être conservés en surface en toute sûreté sur d'aussi longues échelles de temps.

Un projet longuement mûri

Après 15 années de recherche menée par l'Andra et le CEA sur différentes solutions pour ces déchets, une loi a entériné en 2006 le choix du stockage profond, considéré comme la seule solution sûre à long terme. Cette loi charge l'Andra de concevoir Cigéo, le projet de centre industriel de stockage géologique français. S'il est autorisé, les déchets seront stockés dans une installation souterraine située à 500 mètres de profondeur, dans une couche de roche argileuse imperméable de plus de 130 mètres d'épaisseur. Ce concept de stockage garantit le confinement des substances radioactives sur de très longues échelles de temps. Et ce, sans nécessiter d'actions humaines, pour ne pas reporter sur les générations futures la charge de la gestion des déchets que nous avons produits.

Concertation en cours

La loi prévoit également que Cigéo soit réversible pendant au moins 100 ans. Ce qui permettra aux générations qui exploiteront le centre de stockage d'intervenir sur l'installation, par exemple pour revenir sur les orientations prises, modifier les techniques utilisées, voire retirer les colis stockés si besoin. Cigéo pourrait être implanté à la limite des départements de la Meuse et de la Haute-Marne. Entré en phase de conception industrielle en 2011, le projet pourrait recevoir les premiers déchets en 2025. Le débat public organisé en 2013 par la Commission nationale du débat public sera l'un des moments privilégiés d'échanges avec l'ensemble des citoyens, avant le dépôt en 2015 de la demande d'autorisation de création de Cigéo par l'Andra. Ce projet fait également l'objet d'un suivi continu par la Commission nationale d'évaluation, l'Autorité de sûreté nucléaire et le Parlement.

Les déchets FAVL

Les déchets de faible activité à vie longue (FAVL) représentent 7% du volume total des déchets radioactifs produits en France et 0,01% de la radioactivité totale de ces déchets. Ils constituent l'autre famille de déchets qui n'a pas encore de filière de stockage opérationnelle à ce jour. L'Andra étudie actuellement les solutions visant à mettre en œuvre un système de gestion définitif pour ces déchets.

Les déchets FAVL sont aujourd'hui entreposés dans des installations provisoires dans l'attente d'une solution de gestion pérenne. Il s'agit de déchets anciens – leur production est dans la plupart des cas arrêtée – qui se divisent schématiquement en deux familles. Les déchets radifères tirent leur nom du radium : ils proviennent pour l'essentiel du traitement industriel de minéraux et de l'assainissement de sites de production contaminés. Ils représentent un volume de 50 000 tonnes. Les seconds, les graphites – formes solides de carbone – étaient utilisés dans les centrales nucléaires françaises de première génération. Près de 80% de ces 23 000 tonnes de déchets se trouvent toujours au cœur des réacteurs en attente de démantèlement.

Solutions durables

Faiblement radioactifs, les déchets radifères et le graphite le demeurent sur un temps long. Le stockage des premiers s'avère prioritaire car ils sont entreposés dans des équipements temporaires bientôt saturés. En décembre 2012, l'Andra a remis un rapport au gouvernement afin de proposer des perspectives de gestion pour les déchets FAVL. Pour les déchets radifères, leur stockage à faible profondeur (à une quinzaine de mètres), dans une couche d'argile suffisamment épaisse permettant de confiner efficacement la radioactivité à très long terme, est la solution de gestion la plus adaptée à leur nature et la plus sûre. Une étape de caractérisation géologique sur site est nécessaire pour vérifier les performances de sûreté et avant de prendre la décision de démarrer les études du projet industriel. Pour les déchets de graphite, des études de R&D sur le tri et le traitement en amont sont en cours. Les conclusions de ces études, les progrès en matière de caractérisation ainsi que les résultats des investigations géologiques permettront de proposer un scénario de gestion optimal à l'horizon 2015.

– **Opérationnel**, à partir des prévisions triennales établies par chaque site producteur, collectées par l'Andra et mises en regard des capacités d'accueil de ses installations de traitement et de stockage, l'Andra établit le schéma directeur de construction et d'exploitation de ses stockages. Outre le volume, la nature des déchets est importante (type d'emballage, contenu radiologique et chimique), pour optimiser la gestion des ouvrages de stockage, réduire les risques et les coûts.

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

Il est tout aussi essentiel que le producteur du déchet et l'Andra, définissent conjointement les spécifications d'interface liées au colis de déchets. La spécification de production, dépendant du référentiel du producteur de déchet 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 dans les évolutions de leurs installations et modes opératoires. Un développement concourant limite les risques de surcoûts et les délais.

Ce développement a pour objectif d'anticiper autant que possible les évolutions des référentiels des installations productrices de déchets et des stockages. En particulier, les spécifications de production du colis de déchet 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 conditionné, mais est plus difficile dans les cas suivants :

1. Déchet insuffisamment caractérisé au regard des spécifications d'acceptations 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 pour assurer la sûreté de la gestion du déchet à long terme (ex : gaz HCL et H2 produit par radiolyse au sein de colis de déchets anciens contenant des plastiques et des émetteurs alphas, pouvant corroder le colis ou provoquer un mélange explosible) ;

2. Filière de stockage en cours d'étude (Cigéo, FAVL) ;
3. Modification de la stratégie industrielle ou des exigences applicables à l'installation génératrice du déchet ou stockant le déchet. Cette situation peut apparaître suite à une innovation, un incident, ou un réexamen de sûreté de l'installation.

3. Une industrie de gestion des déchets de démantèlement opérationnelle en France, avec quelques chaînons manquants

Les capacités de stockage autorisées (volumes et capacité radiologique) constituent une ressource rare et très difficilement renouvelable. Il est difficile, long et coûteux d'ouvrir un nouveau centre de stockage. L'Andra, en lien avec ses clients, gère cette capacité de manière prudente, en pilotant les volumes et la capacité radiologique consommée. 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, pendant plusieurs décennies.

A) Les déchets de faible et moyenne activité à vie courte : un flux croissant de colis déchets « standards » de démantèlement et des déchets de grandes dimensions

Les déchets de démantèlement sont conditionnés en caissons, fûts métalliques à compacter ou colis prêts à être stockés dans des ouvrages en surface, au centre de stockage de l'Aube (CSFMA) (Figure 3).

À la fin 2010, l'Andra a stocké environ 25% de la capacité de stockage totale autorisée (1 million de m³). La montée en puissance

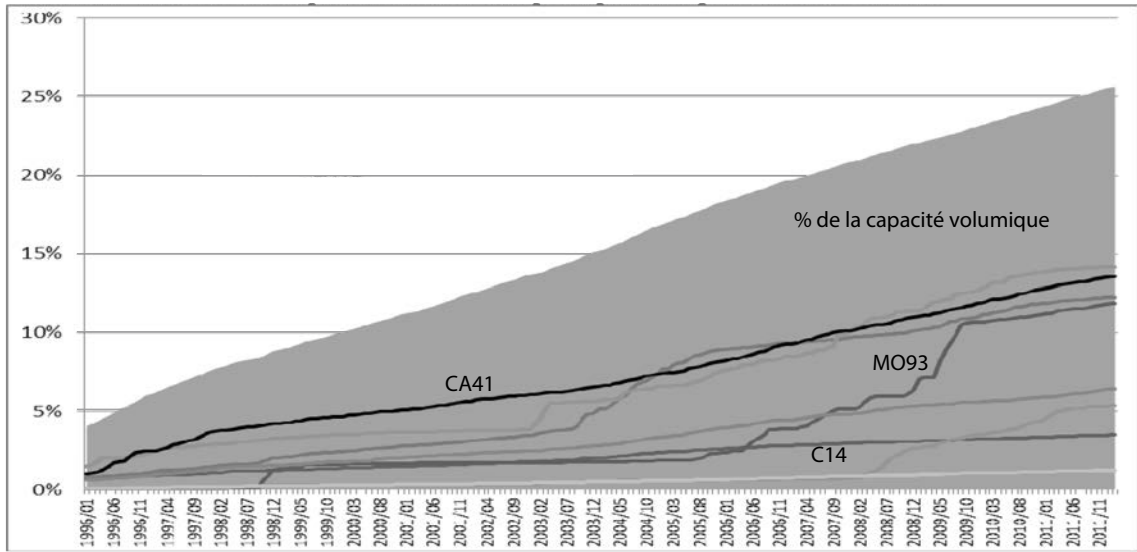


Figure 2. Consommations comparées de capacités volumique et radiologique du CSFMA.

des programmes de démantèlement va non seulement accroître les flux livrés, mais également modifier les proportions des différentes géométries de colis standardisés. Il devrait y avoir ainsi par exemple un nombre beaucoup plus importants de caissons métalliques de 5 ou 10 m³, colis bien adaptés pour des déchets de formes très variées, alors que les déchets d'exploitation (résines, filtres, déchets du cycle du combustible...) sont conditionnés en coques bétons et fûts à compacter.

Grâce aux importants efforts faits depuis une quinzaine d'années pour réduire les quantités de déchets produits par l'exploitation des installations nucléaires et améliorer leur conditionnement, le CSFMA, conçu dans les années 1980 avec une capacité annuelle de

30 000 m³, est suffisamment dimensionné pour accueillir les déchets de démantèlement 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 devoir les découper pour les conditionner en colis standards. Ces opérations évitées sur les chantiers, outre le gain économique et temporel qu'elles procurent, réduisent l'exposition correspondante des travailleurs aux rayonnements ionisants.

La pertinence d'un stockage direct, par rapport à un conditionnement en colis standard, 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), du transport, et du stockage (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 stocker directement des colis hors normes dimensionnelles (couvercles de cuve de réacteur, télémanipulateurs, protections neutroniques de Superphénix...), soit dans des ouvrages standards, soit dans des ouvrages



Figure 3. Ouvrages de stockage du CSFMA.

développés spécifiquement et dotés de moyens de manutention et de conditionnement adaptés (pont de 150 tonnes, équipement d'injection en ouvrage).

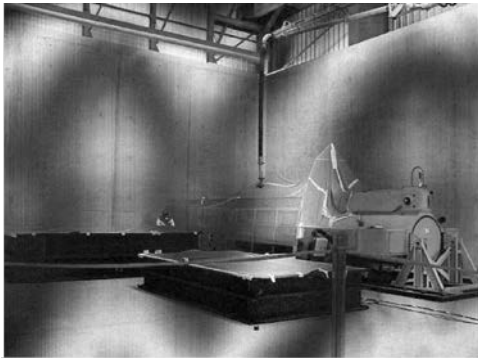


Figure 4. Stockage en ouvrage standard d'un télémanipulateur (8 m, 20 tonnes).



Figure 5. Stockage en ouvrage dédié d'un couvercle de cuve de réacteur à eau sous pression (90 à 120 tonnes).

D'autres développements sont étudiés, pour un stockage direct de la cuve de réacteur de Chooz A, de réacteurs de sous-marin ou d'emballages de transport déclassés. Là encore, compte tenu des responsabilités respectives des différents acteurs, une concertation étroite entre l'Andra et les producteurs de déchets est nécessaire. La manière de gérer ces déchets de grandes tailles pourra également être discutée dans un cadre international pour partager les retours d'expérience.

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

B) Les déchets de très faible activité

Le CSTFA, 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 n'est que potentielle pour une part significative du tonnage des déchets stockés au CSTFA⁶ : près d'un tiers des déchets sont déclarés avec une activité massique inférieure au becquerel par gramme.

Le stockage des déchets se fait dans des alvéoles creusées dans une argile peu perméable qui assure leur confinement à long terme. Le fond et les parois des alvéoles sont tapissés par une membrane étanche. Les déchets (pièces unitaires, GRVS⁷, caissons, fûts) sont déposés dans les alvéoles, abrités des intempéries par une toiture mobile. Les alvéoles sont remblayées avec du sable et fermées par une membrane. Elles sont ensuite recouvertes d'argile. Un puits de visite dans l'alvéole permet de détecter les éventuelles infiltrations d'eau.

Comme pour le CSFMA, le stockage direct des déchets de grande dimension est possible, en alvéole standard. En 2012, l'Andra devait stocker deux générateurs de vapeurs 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.

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

6. 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 contamination ou activation des déchets. Les déchets nucléaires doivent être orientés vers une filière de gestion à traçabilité renforcée, indépendamment de leur activité.

7. Grand récipient vrac solide (*big bag*).



Figure 6. Stockage des déchets TFA.



Figure 7. Fermeture d'alvéole et déplacement de la toiture mobile.

forte croissance et à une densité des déchets trop faible.

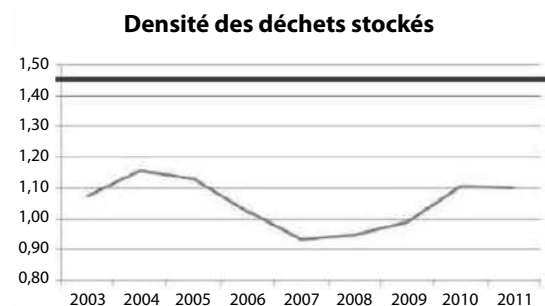
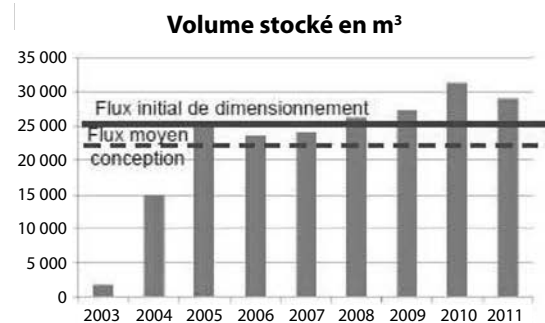
Fin 2011, le volume stocké au CSTFA était de 203 400 m³, soit 31% de la capacité autorisée (650 000 m³). Le flux de conception était de 24 000 m³. Les besoins croissant des producteurs ont conduit l'Andra à optimiser l'emprise du stockage, à augmenter la compacité du stockage de 41% (alvéoles doubles, approfondies, de pentes plus fortes) et modifier le mode d'exploitation pour offrir une capacité de 35 000 m³ par an. D'autres pistes sont à l'étude : optimisation des dômes (+11%), recyclage de déchets de béton concassés stockables en vrac pour combler les vides dans le stockage (économie de 7% de volume, gisement de 64 000 tonnes valorisables), ou sur 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 chantier 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 (voir schéma : 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 bois, filtres presses pour boues).

Environ 1000 m³/an de déchets livrés sont incinérables, ce qui conduirait à un facteur 7 de réduction de volume, mais le bilan économique est très défavorable. L'incinération à Centraco⁸ coûte environ 30 fois plus cher que le stockage au CSTFA. Les incinérateurs de déchets banals ou dangereux (300-500 €/t environ), techniquement adaptés pour incinérer ces déchets, ne sont pas autorisés à traiter des déchets très faiblement radioactifs.

Les déchets métalliques (25 à 30% des déchets livrés) constituent le principal gisement de déchets densifiables. Leur flux prévisionnel



Figures 8 et 9.

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

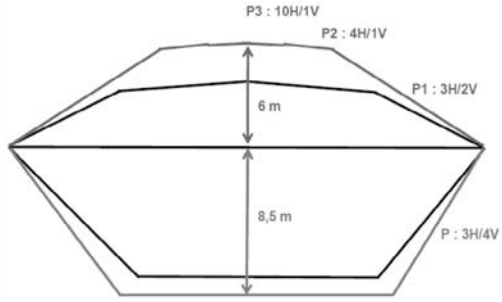


Figure 10. Alvéole optimisée (pente + fond + sommet).



Figure 11. Béton recyclé ou GNT dans les vides.

représente en effet près de 50 % de la capacité de stockage, compte tenu de leur faible densité. Une partie est recyclable, notamment les métaux qui ne sont pas contaminés ou pourraient être facilement décontaminés. La valorisation de ces métaux permettrait d'économiser des volumes précieux de stockage tout en répondant à des objectifs de développement durable.

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

Un procédé de fusion, qui suppose un découpage et tri préalable des déchets, permettrait de densifier les déchets d'un facteur 6 voire d'en recycler une partie sous forme d'emballage de déchets de faible et moyenne activité⁹.

9. Jusqu'à l'accident de septembre 2011 sur le 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.



Figure 12. Balle sortant de la presse du CSTFA.



Figure 13. Déchets agencés sur site.



Figure 14. Four de fusion (Studsvik).



Figure 15. Virole en métal recyclé (Socodei).

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 en février 2012.

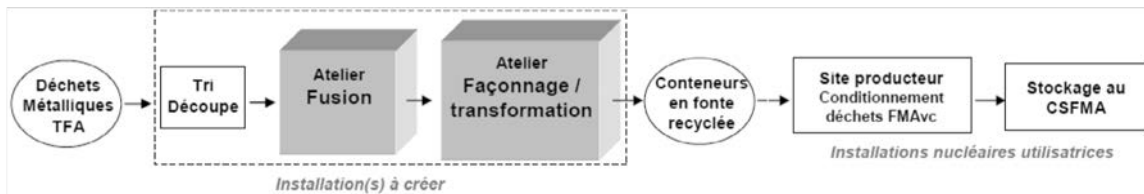


Figure 16.

Le gisement recyclable en conteneur fonte est de quelques milliers de tonnes par an. Une fonderie dédiée est industriellement réalisable, économiquement viable sous conditions. En particulier, les modifications nécessaires pour l'utilisation de ces conteneurs chez les producteurs de déchets comme au CSFMA ne sont pas démontrées. Sous réserve de faisabilité, le coût de ces modifications pourrait compromettre la viabilité économique du recyclage, dont le schéma industriel de principe est décrit dans la Figure 16.

C) Les déchets de haute activité ou de moyenne activité à vie longue (HA, MAVL)

Les déchets HA-MAVL seront produits en quantités relativement limitées par les chantiers de démantèlement. Il s'agit essentiellement de pièces activées dans les réacteurs. Ils sont destinés à être stockés en formation géologique profonde et seront conditionnés et entreposés d'ici leur mise en stockage, notamment dans l'installation d'entreposage «ICEDA» en cours de construction par EDF. 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.

D) Les déchets FAVL

L'essentiel des déchets de faible activité issus de démantèlements sont des éléments en graphite du cœur des réacteurs de la filière Uranium Naturel Graphite Gaz (UNGG) représentant 24000 tonnes. La majeure partie ne peut pas être stockée en surface compte tenu de leur contenu en carbone 14 (5730 ans de période) et en chlore 36 (302000 ans de période), sous une forme chimique pouvant migrer en stockage.

Une fois conditionnés en colis de béton prêts au stockage, ils représenteront environ

100000 m³. L'essentiel du volume (82%) proviendra du démantèlement des «empilements» de graphite dans les réacteurs (Figure 17). 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, de Marcoule et de La Hague.

Les producteurs de déchets et l'Andra étudient conjointement différents scénarios de gestion pour 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, afin d'extraire et concentrer la majeure partie du chlore 36 et du carbone 14. Dans le cadre du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs, l'Andra remettra un rapport fin 2012 sur les différents scénarios de gestion étudiés avec les producteurs de déchets et sur les orientations proposées pour la suite du projet.



Figure 17. Mise en place des empilements de graphite lors de la construction d'une centrale UNGG. (source : EDF)

4. Le défi de la reprise et du conditionnement (RCD) des déchets radioactifs anciens en vue de leur stockage définitif : comment transformer le poids du passé en innovation

Compte tenu de l'âge de ces installations ou 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'au 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 conditionnement et stockage ou d'incompatibilité de spécifications d'acceptation (entreposage, transport, stockage).

En outre, la loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et 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 plusieurs décennies, sont en décalage avec les besoins de connaissances qui seraient nécessaires pour une reprise à coûts et risques maîtrisés et un conditionnement optimisé. Les paramètres importants sont le spectre radiologique, les caractéristiques physico-chimiques du déchet pour maîtriser son comportement intrinsèque et son évolution en entreposage ou en stockage, à court et à long terme (corrosion, gonflement, dégazage...).

Ces opérations nécessitent donc des analyses, développements spécifiques synonymes de délais et coûts, mais parfois aussi porteurs d'innovations majeures (robotique, techniques de décolmatage et décontamination, mesures *in situ* de radionucléides et techniques de conditionnement en ligne).

Pour les déchets en vrac entreposés dans des fosses ou cuves, outre les difficultés inhérentes aux opérations de récupération, la caractérisation et le conditionnement de ces déchets, optimisé pour orienter chaque déchet vers la filière de stockage idoine sou-

lève deux difficultés : caractériser des déchets hétérogènes et anciens, conditionner « in situ » ces déchets dans des emballages compatibles avec les transports puis le stockage définitif, après entreposage d'attente le cas échéant. Or ces déchets peuvent être pâteux avec un surnageant, pulvérulents (diatomées, sels), potentiellement réactifs (magnésiens), dégazants à long terme (gaz de radiolyse).

Pour les déchets déjà conditionnés et entreposés dans des installations vieillissantes, l'enjeu, outre la manutention 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 type est constitué d'environ 60 000 fûts d'enrobés bitumineux entreposés au CEA à Marcoule, dont une partie a déjà été reconditionnée dans des nouveaux fûts. Ces déchets sont selon leurs caractéristiques, stockés au CSFMA ou entreposés en l'attente de Cigéo et des filières de gestion pour les déchets FAVL et Cigéo. L'orientation de ces déchets vers l'une ou l'autre de ces trois filières fait l'objet d'études conjointes CEA-Andra.

5. Une piste prometteuse : l'optimisation « cycle de vie » du démantèlement, de la conception des installations au stockage des déchets ultimes

Pour les installations nucléaires futures, on pourrait imaginer une « écoconception » au sens des déchets. La réglementation issue de la loi transparence et sûreté nucléaire du 16 juin 2006 y invite les exploitants nucléaires.

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

- 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 le recyclage maxi de déchets conventionnels...)

- Minimisation des déchets induits avec deux volets : choix de matériaux minimisant les produits d'activation à vie longue (Cl36, Ca41, Nb94, Mo93...), composants et surfaces facilement décontaminables pour réduire le volume de déchets induits, mais aussi faciliter et accélérer les opérations de démantèlement et réduire la dose pour les intervenants.

Par ailleurs, associer les acteurs de la chaîne industrielle, de transport et de gestion des déchets radioactifs dans la définition de la stratégie de démantèlement permettrait d'améliorer les interfaces entre la déconstruction, les opérations de tri/traitement/conditionnement de déchets et le stockage. Cette approche limiterait les risques d'incohérence de spécifications ou de chroniques de livraison entre les déchets produits et les spécifications d'acceptation en stockage. À ce titre L'Andra promeut auprès de ses clients le développement d'ingénierie concurrente entre exploitant, démantelers, transporteurs et industriels du déchet radioactif dans leur programme 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 les opérateurs intermédiaires : spécifier les interfaces «colis», définir des points d'arrêts aux jalons critiques du démantèlement et jalons critiques des installations de stockage identifiés en commun.

6. Conclusion

En France, comme dans le cadre international de l'AIEA, le démantèlement d'installation nucléaire est un enjeu majeur des vingt ans à venir et une filière industrielle encore jeune. L'industrie française est très bien positionnée sur ce marché d'avenir.

En France, la majeure partie des déchets de démantèlement sont conditionnés et stockés au fur et à mesure de leur production, sur les deux centres de stockage de surface exploités par l'Andra, dont l'adaptabilité

a permis d'accroître les flux d'accueil et la variété des déchets acceptables. Pour ces déchets représentant l'essentiel du volume, les pistes de progrès envisagées sont la poursuite de la réduction des volumes à la source, la densification et dans le cadre de la stratégie de développement durable, le recyclage de déchets métalliques très peu contaminés dans l'industrie nucléaire.

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

La gestion des stockages comme une ressource rare pousse à optimiser les volumes des déchets de démantèlement dans une double logique de «cycle de vie d'installation» et de «cycle de vie du matériau/déchet : du matériau sur pied dans l'INB au colis de déchets ultime stocké». Cette industrie recèle encore des marges de progrès et d'innovation, notamment en intégrant l'ensemble des acteurs industriels de la conception des installations au stockage des déchets induits.

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

L'équilibre n'est jamais simple à définir, en considérant la multitude de paramètres entrant dans la conception d'une installation. La sûreté et la performance industrielle restent les éléments incontournables. Ce difficile exercice d'optimisation est d'autant plus délicat que les techniques et la réglementation applicables peuvent évoluer d'ici le démantèlement et le stockage des déchets induits. ■