

Enjeux du démantèlement des réacteurs à eau sous pression

Rapport n° IRSN/2018-00016

Juillet 2018

Résumé du rapport

Le présent rapport expose les enjeux du démantèlement des réacteurs à eau sous pression.

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015 fixe une limite (63,2 GWe) pour la capacité totale autorisée de production d'électricité d'origine nucléaire en France. Dans ce cadre, EDF prévoit l'arrêt des deux réacteurs de la centrale de Fessenheim lors de la mise en service du réacteur de type « European pressurised reactor » (EPR) de Flamanville.

Cette loi fixe également un objectif de 50 % pour la part du nucléaire dans la production d'électricité (contre 75 % actuellement), devant conduire à l'arrêt définitif d'autres réacteurs. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), qui est un outil de pilotage de la politique énergétique créé par cette même loi et dont la mise à jour est attendue fin 2018, définira plus précisément les scénarios d'évolution des facteurs de production d'énergie.

Dans ce contexte, l'IRSN a élaboré un rapport présentant, du point de vue de la sûreté nucléaire, de la radioprotection et de la protection de l'environnement, les enjeux du démantèlement des réacteurs à eau sous pression.

Les grandes étapes du démantèlement d'un réacteur sont :

- l'évacuation des matières et des déchets encore présents dans l'installation à la fin du fonctionnement, en utilisant généralement les équipements utilisés lors de la période de fonctionnement ;
- le démontage, la découpe et l'évacuation en tant que déchets des matériels (équipements du procédé et leurs périphériques), éventuellement après une décontamination. Ces opérations nécessitent la mise en place préalable de nouveaux équipements ;
- l'assainissement des locaux et la dépollution des sols le cas échéant ;
- la réhabilitation du site incluant le cas échéant la démolition des bâtiments de l'installation.

Si les premières opérations d'un démantèlement sont proches de celles réalisées lorsque le réacteur est en fonctionnement (évacuation des assemblages combustibles et des déchets de fonctionnement, démontage de certains équipements), elles s'en écartent notablement au fur et à mesure de l'avancement des travaux (démontages d'équipements spécifiques, assainissement de structure et de sols afin d'atteindre l'état final visé).

De manière concomitante, les risques évoluent ; les risques pour l'environnement diminuent, les risques d'origine non nucléaire s'accroissent (risques d'incendie, d'origine électrique, liés aux manutentions...) et les risques pour les opérateurs sont différents du fait du type de travaux réalisés, pouvant nécessiter l'intervention d'opérateurs à proximité des équipements à démonter.

Le démantèlement recouvre ainsi un ensemble d'opérations très variées, de natures différentes et pouvant se dérouler simultanément dans de nombreuses parties de l'installation, induisant notamment des risques liés à la co-activité. De plus, ces opérations, qui s'étalent sur une longue période, sont réalisées avec une organisation et des équipes différentes de celles en place lors du fonctionnement. Les facteurs organisationnels et humains constituent donc un enjeu d'une importance toute particulière. Sur ce point, la standardisation du démantèlement des réacteurs d'EDF et la mutualisation des moyens nécessaires sont des éléments favorables.

S'agissant des réacteurs à eau sous pression, le retour d'expérience acquis, tant en France qu'à l'international, montre que leur démantèlement est techniquement faisable, dans des délais maîtrisés, en utilisant des techniques aujourd'hui connues et éprouvées. En outre, des opérations de remplacement d'équipements lourds réalisées par le passé pour les réacteurs actuellement en exploitation (générateurs de vapeurs, couvercles de cuve notamment) ont apporté des éléments de retour d'expérience importants. Ainsi, de par le monde, des démantèlements complets de ce type d'installation ont déjà été réalisés. Par ailleurs, en France, le démantèlement, en cours, du réacteur Chooz A d'EDF, situé dans les Ardennes, n'a pas mis en évidence de difficulté majeure. A cet égard, il se distingue du démantèlement des réacteurs uranium naturel graphite gaz (UNGG) d'EDF, dont la conception rend leur démantèlement complexe et requiert des développements importants.

Le démantèlement d'une installation nucléaire est une activité industrielle à part entière, s'appuyant sur des compétences, connaissances et organisations spécifiques.

Le retour d'expérience en France et à l'international montre que les exploitants sous-traitent de nombreuses opérations auprès d'industriels spécialisés. Ce recours à la sous-traitance ne se distingue toutefois pas, sur le principe, de celle mise en œuvre lors du fonctionnement des réacteurs (arrêts de tranche, remplacement de gros équipements...). La maîtrise de l'accroissement de cette sous-traitance et la disponibilité de sous-traitants qualifiés sont des enjeux majeurs. En particulier, la disponibilité de moyens suffisants, en effectifs et en compétences, ainsi que d'une organisation et d'une gestion, notamment contractuelle, adaptées pour encadrer cette sous-traitance est un enjeu essentiel en termes de sûreté nucléaire et de radioprotection.

La capacité des industriels (notamment en termes de compétences, d'organisation et de moyens techniques) à répondre à l'accroissement du nombre de réacteurs à démanteler est liée à une visibilité suffisante du marché du démantèlement, et donc tout particulièrement des programmes à venir.

Le démantèlement d'une installation, qui doit être géré comme un projet industriel, s'appuie sur des installations supports et des moyens de transport (notamment pour la découpe de matériels, l'entreposage, le traitement et le conditionnement des déchets, le traitement des effluents...). La maîtrise des éléments nécessaires à la bonne réalisation des opérations de démantèlement, en termes de sûreté ou de gestion de projet, est donc un enjeu important. Cela concerne tout particulièrement les capacités et disponibilités de ces installations supports et moyens de transport, d'autant plus s'ils ne sont pas spécifiques à ce démantèlement.

La connaissance de l'état de l'installation au moment de son arrêt est un élément structurant pour préparer le démantèlement à réaliser (opérations à réaliser, condition d'intervention, planification...). De même, la définition de l'état final visé est un élément à définir au plus tôt. La collecte, la conservation et l'accès aux informations acquises lors de la conception, de la construction et du fonctionnement et leur enrichissement durant le démantèlement constituent un enjeu important. Plus généralement, la constitution et la valorisation du retour d'expérience des démantèlements sont à organiser particulièrement.

Le démantèlement d'une installation implique la production de déchets solides et liquides, le rejet d'effluents liquides et gazeux et une exposition aux rayonnements ionisants des travailleurs. Les choix des procédés et des méthodes d'assainissement constituent de ce point de vue un enjeu particulier.

En conclusion, du point de vue de la sûreté nucléaire et de la radioprotection, les enjeux exposés ci-dessus doivent être pris en compte dans la préparation et la réalisation des projets de démantèlement.

Table des Matières

1	INTRODUCTION	5
2	GENERALITES CONCERNANT LE DEMANTELEMENT.....	5
2.1	Différents statuts d'une installation nucléaire.....	5
2.2	Spécificités du démantèlement.....	6
3	PANORAMA DU DEMANTELEMENT DES REACTEURS DE PUISSANCE	8
3.1	Démantèlement en cours dans le monde.....	8
3.2	Démantèlement des réacteurs de types REP et REB en Europe et aux USA.....	9
3.3	Perspectives de démantèlement en Europe.....	10
4	REACTEURS DE PUISSANCE EN COURS DE DEMANTELEMENT EN FRANCE.....	11
4.1	Stratégie générale suivie par EDF.....	11
4.2	Projets d'EDF en cours d'achèvement.....	12
4.3	Les enjeux du démantèlement des réacteurs UNGG.....	12
5	GOVERNANCE, ORGANISATION ET ACTEURS DU DEMANTELEMENT	14
5.1	Le cas du démantèlement des réacteurs d'EDF.....	15
5.2	La situation en Allemagne	15
5.3	La situation aux USA	16
6	ENJEUX DU DEMANTELEMENT DES REACTEURS A EAU SOUS PRESSION.....	16
6.1	Modalités d'arrêt définitif et de démantèlement envisagées par EDF.....	16
6.2	Quelques spécificités des CNPE français	18
6.3	Stratégie, état final et données à collecter.....	20
6.4	Préparation du démantèlement et état initial	21
6.5	Démantèlement	22
6.6	Gestion des déchets.....	25
7	CONCLUSION	27
	GLOSSAIRE	30

1 INTRODUCTION

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015 fixe une limite (63,2 GWe) pour la capacité totale autorisée de production d'électricité d'origine nucléaire en France. Dans ce cadre, EDF prévoit l'arrêt des deux réacteurs de la centrale de Fessenheim lors de la mise en service du réacteur de type « European pressurised reactor » (EPR) de Flamanville.

Cette loi fixe également un objectif de 50 % pour la part du nucléaire dans la production d'électricité (contre 75 % actuellement), devant conduire à l'arrêt définitif d'autres réacteurs. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), qui est un outil de pilotage de la politique énergétique créé par cette même loi et dont la mise à jour est attendue fin 2018, définira plus précisément les scénarios d'évolution des facteurs de production d'énergie.

Dans ce contexte, l'IRSN a élaboré un rapport présentant, du point de vue de la sûreté nucléaire, de la radioprotection et de la protection de l'environnement, les enjeux du démantèlement des réacteurs à eau sous pression (REP).

2 GENERALITES CONCERNANT LE DEMANTELEMENT

2.1 Différents statuts d'une installation nucléaire

Une installation nucléaire de base (INB) connaît au cours du temps trois statuts successifs, associés chacun à des actes réglementaires spécifiques (cf. tableau 2.1). **Le statut d'installation en démantèlement se conclut par l'assainissement des bâtiments et des sols (retrait des contaminations), en vue de rendre le site apte à un autre usage, éventuellement après démolition des bâtiments.** À l'issue de ces opérations, le déclassement de l'installation fait l'objet d'une décision de l'autorité de sûreté nucléaire (ASN).

Tableau 2.1 - Actes réglementaires associés à une INB selon son statut

Statut de l'installation nucléaire	Acte réglementaire associé
choix de site, conception et construction	décret d'autorisation de création
fonctionnement	autorisation de mise en service (décision ASN)
démantèlement	décret de démantèlement

Exploitation {

Les périodes de fonctionnement et de démantèlement (DEM) correspondent, au sens réglementaire, à l'exploitation de l'installation, durant laquelle l'exploitant réalise périodiquement (tous les 10 ans) des réexamens de sûreté visant à réapprécier les risques et inconvénients présentés par l'installation.

La transition entre la fin du fonctionnement de l'installation et le début de son démantèlement constitue une étape (cf. figure 2.1) au cours de laquelle le démantèlement est préparé administrativement (procédure d'obtention du décret) et techniquement (réalisation d'opérations couvertes par le référentiel de fonctionnement incluant notamment des évacuations de matières radioactives).

Le démantèlement concerne donc, à terme, tous les types d'installations nucléaires existantes.

2.2 Spécificités du démantèlement

Le démantèlement nécessite l'emploi de techniques et de procédés très différents de ceux mis en œuvre lors du fonctionnement, avec généralement la conception d'équipements dédiés et la construction de nouvelles installations, notamment pour gérer les déchets. De plus, les techniques et procédés utilisés évoluent tout au long des opérations.

Les opérations techniques pour préparer le démantèlement puis le réaliser consistent principalement à :

- évacuer les matières et les déchets radioactifs encore présents dans l'installation à la fin du fonctionnement, en utilisant généralement les équipements de la période de fonctionnement ;
- mettre en place les équipements spécifiques nécessaires pour la suite des opérations ;
- démonter, découper et évacuer les matériels (équipements du procédé et installations annexes), éventuellement après une décontamination ;
- assainir les locaux et dépolluer l'environnement si nécessaire ;
- rendre le site apte à un autre usage, après réhabilitation du site et démolition éventuelle des bâtiments de l'installation.

Le démantèlement d'une installation recouvre donc un ensemble d'opérations très variées, de natures différentes et pouvant se dérouler concomitamment dans de nombreuses parties de l'installation. De plus, ces opérations, qui s'étalent sur une longue période, sont réalisées avec une organisation et des équipes souvent différentes de celles mises en place lors du fonctionnement.

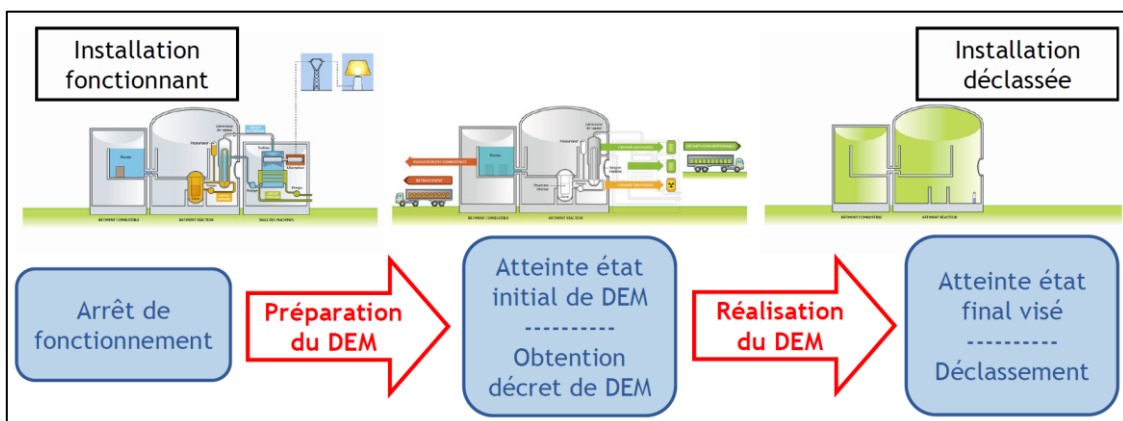


Figure 2.1 - Etapes successives depuis le fonctionnement jusqu'au déclassé d'un réacteur de type REP (DEM : démantèlement)

Aussi, le démantèlement d'une installation nucléaire est une activité industrielle à part entière, différente de son fonctionnement, qui doit être anticipée et conduite avec une organisation dédiée.

Plusieurs éléments caractérisent un démantèlement (cf. figure 2.1) ; ce sont :

- l'état initial de l'installation, avec notamment une connaissance suffisamment précise des activités radiologiques (c'est-à-dire la quantité de matières radioactive) résiduelles dans les équipements de procédé et les locaux ainsi que des particularités de conception de l'installation et de ses matériels, de l'historique de son fonctionnement (par exemple les incidents ayant entraîné des contaminations localisées de zones non accessibles) et de l'état d'équipements existants qui pourraient servir lors du démantèlement (systèmes de manutention par exemple). Ces éléments constituent les données de base des projets de démantèlement ;

- la stratégie, le phasage (ou ordonnancement des lots de travaux), la planification (ou distribution temporelle), les scénarios (ou séquences de tâches élémentaires) et les techniques retenus pour les opérations, qui cadrent les moyens matériels et humains nécessaires pour la conduite du démantèlement. Ces éléments permettront notamment de réaliser l'étude de sûreté des opérations de démantèlement à réaliser et de justifier les choix en termes de gestion des déchets et de rejet d'effluents ;
- l'état final visé, qui définit notamment le niveau d'assainissement des locaux, le devenir des bâtiments (réutilisation ou démolition) ainsi que les objectifs de la réhabilitation du site (dépollutions éventuelles, remblayage...), afin d'aboutir au déclassement de l'installation, assorti, si nécessaire, de dispositions techniques (rabattement de nappe, surveillance de l'environnement...) ou de restrictions d'usage (usage industriel...).

Selon les standards de l'agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), deux stratégies de démantèlement peuvent être mises en œuvre, soit un démantèlement « immédiat », soit un démantèlement « différé ». Dans le premier cas, qui est privilégié, le démantèlement de l'installation est engagé dès la fin de son fonctionnement, pour atteindre l'état final visé sans aucune interruption volontaire des opérations. Dans le second cas, les parties de l'installation contenant la majorité des substances radioactives résiduelles sont maintenues dans un état sûr pendant plusieurs décennies avant le début des opérations de démantèlement les concernant (par exemple pour bénéficier de la décroissance naturelle de la radioactivité). En revanche, les parties « conventionnelles » ou peu contaminées de l'installation peuvent être démantelées dès l'arrêt de l'installation.

En France, le code de l'environnement précise que le délai « entre l'arrêt définitif du fonctionnement de l'installation et le démantèlement de celle-ci » est « aussi court que possible, dans des conditions économiquement acceptables ».

Par ailleurs, il doit être tenu compte du fait que la connaissance de l'installation peut être imparfaite (absence de plans de réalisation initiaux par exemple), de même que celle de son historique (incidents et modifications dont les traces ont pu être perdues). Aussi, des vérifications de l'état de l'installation sont généralement à prévoir, notamment en préalable à la réalisation de phases de travaux à risques particuliers.

Au cours d'un démantèlement, la configuration de l'installation, et donc les risques, évoluent en permanence. Certains risques diminuent (dégagement thermique, criticité, radiolyse...), et disparaissent progressivement, alors que d'autres peuvent être temporairement accentués (dissémination, incendie, manutention, co-activité et concomitance des chantiers...) ou apparaître (liés aux procédés spécifiques de démantèlement, d'assainissement et de démolition). Par ailleurs, la radioprotection des travailleurs évolue de manière significative tout au long des opérations, en fonction de la diminution des quantités de matière radioactive, mais aussi de la nature des opérations à réaliser. Des aléas peuvent également survenir. **En tout état de cause, un examen de la sûreté et de la radioprotection dédié doit être réalisé.**

En règle générale, comparativement à son fonctionnement, les risques associés au démantèlement d'une installation sont plus faibles pour l'environnement et les personnes du public. Les risques pour les travailleurs peuvent être plus importants, en raison de la nature des opérations à effectuer. Celles-ci se rapprochent d'activités de chantier avec des interventions à proximité ou « au contact » de matériels contaminés ou activés.

Les risques « classiques » sont plus importants lors du démantèlement du fait notamment des travaux réalisés, comprenant notamment des démontages, des découpes avec création de points chauds et des manutentions pouvant être effectuées à des hauteurs importantes. Ils sont traités selon les règles de sécurité définies par le code du travail, en tenant compte des implications radiologiques et des conséquences potentielles pour la sûreté.

Enfin, la préparation des opérations, l'appel à des entreprises spécialisées, la formation du personnel, la réalisation préalable d'études de sûreté et le suivi des opérations sont des conditions nécessaires au bon déroulement d'un démantèlement. Dans ce contexte, les facteurs humains et l'organisation des opérations concernées revêtent une importance toute particulière.

3 PANORAMA DU DEMANTELEMENT DES REACTEURS DE PUISSANCE

Au 31 décembre 2017, 614 réacteurs de production d'électricité (dits « de puissance ») ont été mis en service à travers le monde (cf. AIEA - Reference Data Series No. 2 - 2018 Edition - « Nuclear Power Reactors in the World »), dont 342 réacteurs à eau sous pression (REP - PWR en anglais) et 115 réacteurs à eau bouillante (REB - BWR en anglais).

Parmi les 457 réacteurs de types REP et REB, environ 80 % d'entre eux ont été mis en service dans les années 1970 à 1990 ; 50 de type REP et 40 de type REB sont définitivement arrêtés, en cours de démantèlement ou démantelés (cf. figure 3.1 - graphique de gauche).

3.1 Démantèlement en cours dans le monde

Sur les 166 réacteurs de puissance (toutes filières confondues) définitivement arrêtés, en cours de démantèlement ou démantelés à travers le monde au 31 décembre 2017, 105 sont localisés en Europe (cf. figure 3.1 - graphique de droite). Ces derniers incluent notamment 37 réacteurs refroidis par un gaz (GCR en anglais) principalement localisés au Royaume-Uni (27 unités) et en France (8 unités).

S'agissant des réacteurs de types REP et REB, sur les 90 définitivement arrêtés, en cours de démantèlement ou démantelés à travers le monde au 31 décembre 2017, 28 sont localisés aux USA et 56 en Europe, dont 24 en Allemagne (cf. figures 3.1 et 3.2).

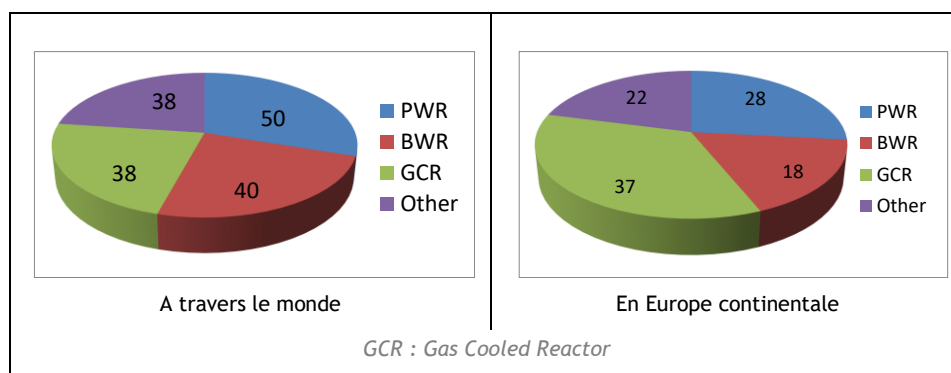


Figure 3.1 - Réacteurs de puissance définitivement arrêtés au 31/12/2017 par principaux types

Le démantèlement d'environ 30 % d'entre eux est avancé (cuves des réacteurs et leurs internes démantelés), voire achevé ; cela concerne essentiellement les États-Unis et l'Allemagne.

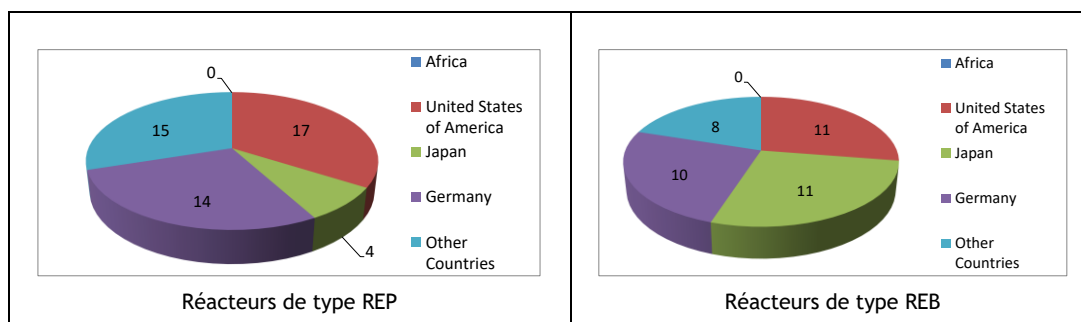


Figure 3.2 - Réacteurs définitivement arrêtés au 31/12/2017 par répartition géographique à travers le monde

Enfin, 5 des 90 réacteurs de types REP et REB cités précédemment ont été arrêtés consécutivement à des accidents (Three Mile Island en 1979 et Fukushima en 2011).

3.2 Démantèlement des réacteurs de types REP et REB en Europe et aux USA

A ce jour, à travers le monde, 10 réacteurs de types REP et REB de puissance significative (> 50 MWe) ont été totalement démantelés, voire déclassés (cf. tableau 3.1) ; tous étaient implantés aux États-Unis.

Tableau 3.1 - Liste des réacteurs de types REP et REB totalement démantelés

Unités REP	Connecticut Yankee (560 MWe), Maine Yankee (860 MWe), Rancho Seco (873 MWe), San Onofre 1 (436 MWe), Shippingport (60 MWe), Trojan (1 095 MWe) et Yankee Rowe (167 MWe)
Unités REB	Big Rock Point (67 MWe), Pathfinder (59 MWe) et Shoreham (820 MWe)

Toujours aux États-Unis, 6 autres démantèlements de réacteurs de types REP et REB, soit sont presque achevés - centrales d'Humboldt Bay (REB 63 MWe) et de Zion (2 unités REP jumelées 2 x 1 040 MWe - cf. figure 3.3), soit débutent - centrales de Vermont Yankee (REB 605 MWe) et de San Onofre (2 unités REP 1 070 et 1 080 MWe).

Les démantèlements de réacteurs de types REP et REB actuellement menés en Europe continentale ont un avancement variable, allant de l'évacuation du combustible usé en cours de réalisation au démantèlement achevé du circuit primaire principal (cuve avec ses internes et ses boucles de refroidissement pour les réacteurs de type REP). Cette dernière situation concerne 10 réacteurs allemands de puissance significative - Greifswald (5 unités REP 408 MWe), Gundremmingen-A (REB 237 MWe), Obrigheim (REP 340 MWe), Rheinsberg (REP 62 MWe), Stade (REP 640 MWe) et Wuergassen (REB 640 MWe - cf. figure 3.4), ainsi que le réacteur espagnol José Cabrera (REP 160 MWe).

Parmi les démantèlements de réacteurs de puissance en cours en Europe, peuvent également être cités ceux des réacteurs de Barsebäck (Suède - 2 unités REB 600 MWe), Chooz A (France - REP 305 MWe), Muelheim-Kaerlich, Neckarwestheim 1 et Phillipsburg 1 (Allemagne - REP 1 219 MWe, REP 785 MWe et REB 890 MWe). Le seul réacteur de puissance significative à ce jour totalement démantelé (et déclassé) en Europe est le prototype de Niederaichbach (Allemagne - 106 MWe), modéré avec de l'eau lourde et refroidi par un gaz.

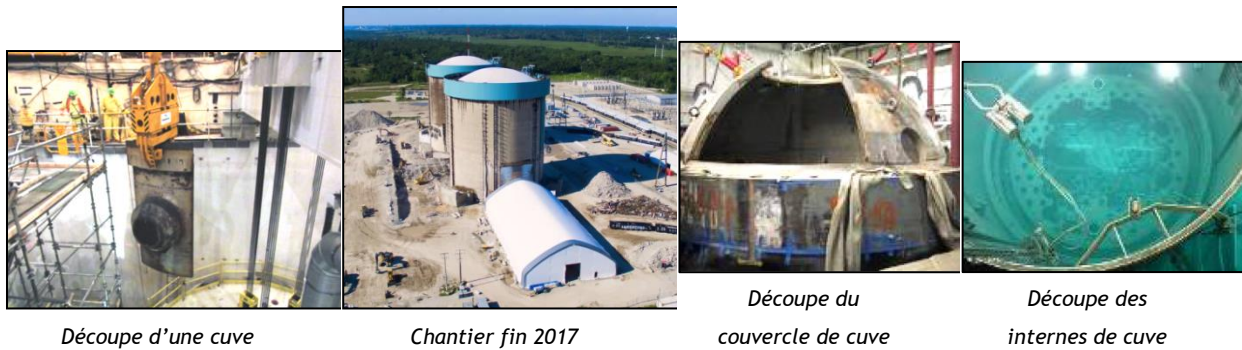


Figure 3.3 - Démantèlement unités REP jumelées de Zion (USA)

Figure 3.4 - Démantèlement unité REB de Wuergrass (Allemagne)

Globalement, il ressort de ces projets que le **démantèlement complet d'un réacteur de type REP (ou REB, la France n'en possédant pas) est techniquement possible sur une vingtaine d'années**. S'agissant plus particulièrement des opérations de démantèlement de la cuve et de ses internes, le retour d'expérience disponible montre que ces opérations peuvent être conduites sur une durée qui peut varier de quelques mois à quelques années selon les modalités retenues (gestion monobloc, découpe en grosses pièces ou découpe en petits morceaux).

Toutefois, outre les aspects techniques, les contextes économiques, réglementaires et sociétaux, différents d'un pays à l'autre, influent sur la durée totale du projet.

3.3 Perspectives de démantèlement en Europe

Sur les 448 réacteurs de puissance en fonctionnement à travers le monde au 31 décembre 2017, 182 sont localisés en Europe continentale (cf. figure 3.5). Ce sont majoritairement des réacteurs de types REP et REB, tant à l'échelle mondiale qu'europpéenne (un peu plus de 80 % des unités dans un cas comme dans l'autre).

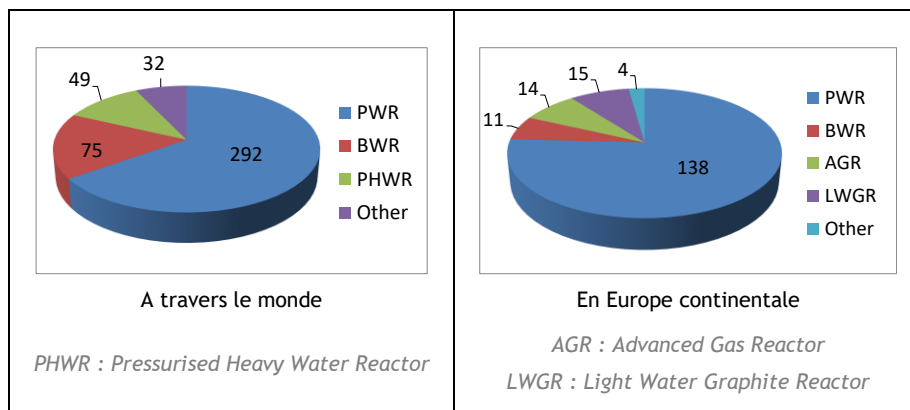


Figure 3.5 - Réacteurs de puissance en fonctionnement au 31/12/2017 par principaux types

Pour les réacteurs en fonctionnement en Europe continentale, la majorité d'entre eux auront plus de 50 ans à l'horizon 2035 (cf. figure 3.6 - graphiques à gauche et au centre).

A l'horizon 2035, hors France, plus de la moitié de ces réacteurs pourraient être définitivement arrêtés (cf. figure 3.6 - graphique de droite, qui distingue les arrêts définitifs probables, à savoir prévus réglementairement, de ceux possibles, mais incertains). Pour les réacteurs de type REP et REB, les arrêts définitifs probables dans les 15 ans à venir se concentrent sur l'Allemagne, la Belgique, la Suède et la Suisse ; ceux possibles concernent majoritairement la Russie et l'Ukraine.

A la même échéance, l'ensemble des réacteurs de types « Advanced gas reactor » (AGR - Royaume-Uni) et « Light water graphite reactor » (LWGR - Russie) devraient également être définitivement arrêtés.

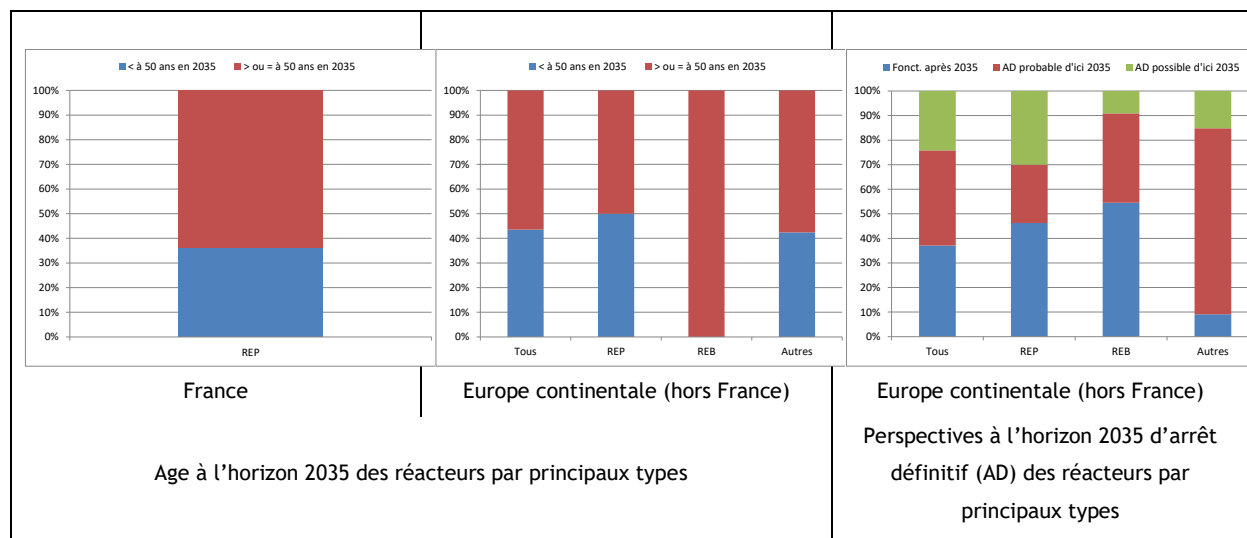


Figure 3.6 - Ages et perspectives d'arrêt définitif des réacteurs européens

Pour la France, 12 réacteurs de puissance sont en cours de démantèlement (cf. paragraphe 4 ci-après) et l'arrêt définitif des 2 réacteurs (900 MWe chacun) de la centrale de Fessenheim est annoncé. L'application de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte conduira à d'autres arrêts.

4 REACTEURS DE PUISSANCE EN COURS DE DEMANTELEMENT EN FRANCE

Douze réacteurs de puissance sont en cours de démantèlement en France, 9 appartenant à EDF et 3 au CEA. Les réacteurs d'EDF sont implantés sur les sites du Bugey, de Chinon et de Saint-Laurent-des-Eaux (6 réacteurs de type uranium naturel graphite gaz - UNGG, GCR en anglais), ainsi que sur les sites de Brennilis (EL4-D, réacteur à eau lourde), Chooz (Chooz A, réacteur de type REP) et Creys-Malville (Superphénix, réacteur à neutrons rapides - RNR). Les réacteurs du CEA sont implantés sur le site de Marcoule (réacteurs G2 et G3 de type UNGG et réacteur Phénix de type RNR).

4.1 Stratégie générale suivie par EDF

EDF a initialement défini pour ses réacteurs de première génération une stratégie de démantèlement différé. Dans cette perspective, après l'évacuation du combustible utilisé, EDF a réalisé un démantèlement partiel des réacteurs (parties conventionnelles, piscines de désactivation, certains circuits actifs...) et déposé des dossiers auprès des autorités compétentes pour obtenir le statut d'installation d'entreposage de ses propres déchets (INB-E). Les 3 réacteurs de type UNGG du site de Chinon et les réacteurs EL4-D et Chooz A ont obtenu ce statut.

En 2001, EDF a finalement décidé de ne plus différer davantage le démantèlement de l'ensemble de ses réacteurs définitivement arrêtés.

4.2 Projets d'EDF en cours d'achèvement

Le démantèlement du réacteur Superphénix (1 200 MWe, de type RNR refroidi au sodium), arrêté définitivement en 1998, a débuté il y a environ 15 ans et avance globalement selon le calendrier initialement défini par EDF. Le traitement des 6 000 tonnes de sodium des circuits primaire et secondaire est achevé depuis 2014, réduisant de manière importante les risques d'incendie et d'explosion dans l'installation. Les boucles du circuit secondaire et les principaux composants du circuit primaire (pompes, échangeurs...) ont été totalement démantelés. Le démantèlement de la cuve du réacteur et de ses internes devrait commencer au second semestre 2018.

S'agissant du réacteur Chooz A (305 MWe, de type REP), construit dans deux cavernes creusées à flanc de colline et définitivement arrêté en 1991, les 4 boucles du circuit primaire ont été découpées et évacuées entre 2011 et 2014 et, après les travaux préparatoires menés depuis 2015, le démantèlement de la cuve et de ses internes a débuté en mars 2017 (cf. figure 4.1).

A l'horizon 2020, EDF devrait débiter les opérations d'assainissement dans ces deux réacteurs pour permettre leur déclassement dans les années qui suivront.



Figure 4.1 - Démantèlement du réacteur Chooz A

4.3 Les enjeux du démantèlement des réacteurs UNGG

4.3.1 Projets EDF

Pour les 3 réacteurs de type UNGG implantés à Chinon (les plus anciens - de puissances 70, 210 et 365 MWe), l'arrêt de production a eu lieu respectivement en 1973, 1985 et 1990. Pour les 2 réacteurs exploités à Saint-Laurent-des-Eaux (480 et 515 MWe) et celui implanté à Bugey (540 MWe), cet arrêt a eu lieu respectivement en 1990, 1992 et 1994.

Au début des années 2000, EDF avait pour objectif d'achever le démantèlement de ces 6 réacteurs avant 2030. Le projet d'EDF était de transférer les déchets de graphite des empilements (1 100 à 2 600 t selon le réacteur considéré) contenus dans les caissons des réacteurs dans une installation de stockage de déchets de faible activité à vie longue (FA-VL). EDF, considérant le glissement des échéances de construction et de mise en service de ce stockage, a ensuite révisé son calendrier et a visé une fin des opérations plutôt vers 2045.

EDF faisait également état de la complexité technique du démantèlement des réacteurs de ce type, très différents d'un réacteur de type REP.

Fin 2015, sur la base d'études détaillées, EDF a revu sa stratégie de démantèlement des réacteurs de type UNGG en termes de calendrier et de procédé technique. Désormais, un démantèlement des caissons sous air, à distance et en vision indirecte (au lieu de sous eau, à distance et en vision directe pour 4 d'entre eux) est retenu par EDF pour tous les réacteurs. La mise au point du procédé et la volonté d'EDF de réaliser le démantèlement complet d'un premier caisson de réacteur avant d'entamer celui des 5 autres conduisent désormais EDF à fixer la fin du démantèlement du dernier réacteur de type UNGG au-delà de 2100.

Ce changement de stratégie fait actuellement l'objet d'une instruction de l'ASN et d'une expertise de l'IRSN. Le maintien des caissons des réacteurs durant une période multi-décennale soulève notamment des questions liées au vieillissement de leurs structures métalliques et de génie civil.

EDF démantèle également le réacteur prototype EL4-D (70 MWe), implanté à Brennilis et définitivement arrêté en 1985. Entre 1996 et 2007, de nombreuses opérations de démantèlement ont été conduites. Après annulation du décret de démantèlement par le Conseil d'État, les opérations ont été interrompues de mi-2007 à fin 2011.

La poursuite du démantèlement a été autorisée en 2012 par un nouveau décret, limitant toutefois son périmètre aux échangeurs de chaleur du réacteur et aux infrastructures résiduelles du génie civil de la station de traitement des effluents. En effet, en l'absence de disponibilité de l'installation dédiée à la réception des déchets les plus actifs (installation ICEDA d'EDF en cours de création sur le site du Bugey), l'ultime opération (démantèlement du bloc du réacteur) n'a pas été autorisée.

A ce jour, les opérations autorisées sont en voie d'achèvement. EDF envisage d'effectuer le démantèlement du bloc réacteur entre 2020 et 2030, pour parvenir à un déclassement de l'installation avant 2035.

4.3.2 Projets du CEA

A Marcoule, le réacteur Phénix (250 MWe, de type RNR refroidi au sodium) est à l'arrêt définitif depuis 2010. Préalablement au démantèlement de la cuve du réacteur, le CEA doit achever le déchargement des assemblages combustibles encore présents dans celle-ci (environ 200 assemblages), puis effectuer le traitement du sodium (environ 1500 t). Cette dernière opération nécessite préalablement la mise en service d'une installation dédiée. Le déclassement du réacteur est actuellement prévu par le CEA à l'horizon 2050.

S'agissant des réacteurs G2 et G3 (de type UNGG), également implantés à Marcoule et définitivement arrêtés en 1980 et 1984, ils ont fait l'objet d'un démantèlement partiel et d'une mise en configuration sécurisée dans la dizaine d'années après leur arrêt. Pour tenir compte de la mise en service d'une installation de stockage des déchets FA-VL ainsi que de la disponibilité d'un retour d'expérience suffisant du démantèlement des réacteurs équivalents d'EDF, le CEA a également retenu l'option d'un démantèlement différé des caissons de ces réacteurs, précédé d'une période multi-décennale de surveillance.

Du fait des évolutions concernant les réacteurs de type UNGG d'EDF, le CEA annonce débiter le démantèlement des caissons des réacteurs G2 et G3 après 2040. A l'instar des réacteurs EDF de type UNGG, le maintien des caissons durant une période multi-décennale soulève des questions liées à leur vieillissement.

5 GOUVERNANCE, ORGANISATION ET ACTEURS DU DEMANTELEMENT

Quel que soit le pays considéré, l'exploitant est responsable de la sûreté de ses installations nucléaires jusqu'à leur déclassement. Cette responsabilité inclut le démantèlement et la gestion des combustibles usés, des déchets et des effluents, ainsi que le financement de ces activités. En cas de changement d'exploitant nucléaire, le nouvel exploitant endosse la totalité des responsabilités lui incombant.

L'exploitant peut faire appel à des prestataires pour les activités d'études, ainsi que pour la conduite opérationnelle des activités de démantèlement et de gestion des déchets et effluents. Il doit toutefois maîtriser toutes les étapes de planification, conception et réalisation du projet dans sa globalité (rôle et responsabilités de maître d'ouvrage). Ses responsabilités couvrent la définition amont des phases industrielles de démantèlement (incluant la maîtrise des risques et inconvénients), en tenant compte du retour d'expérience disponible, l'élaboration des spécifications techniques des contrats de sous-traitance d'activités de démantèlement (intégrant les exigences de sûreté et radioprotection), ainsi que la maîtrise technique / coût / délai des projets, qui s'avèrent complexes pour des réacteurs de puissance (cf. figure 5.1).

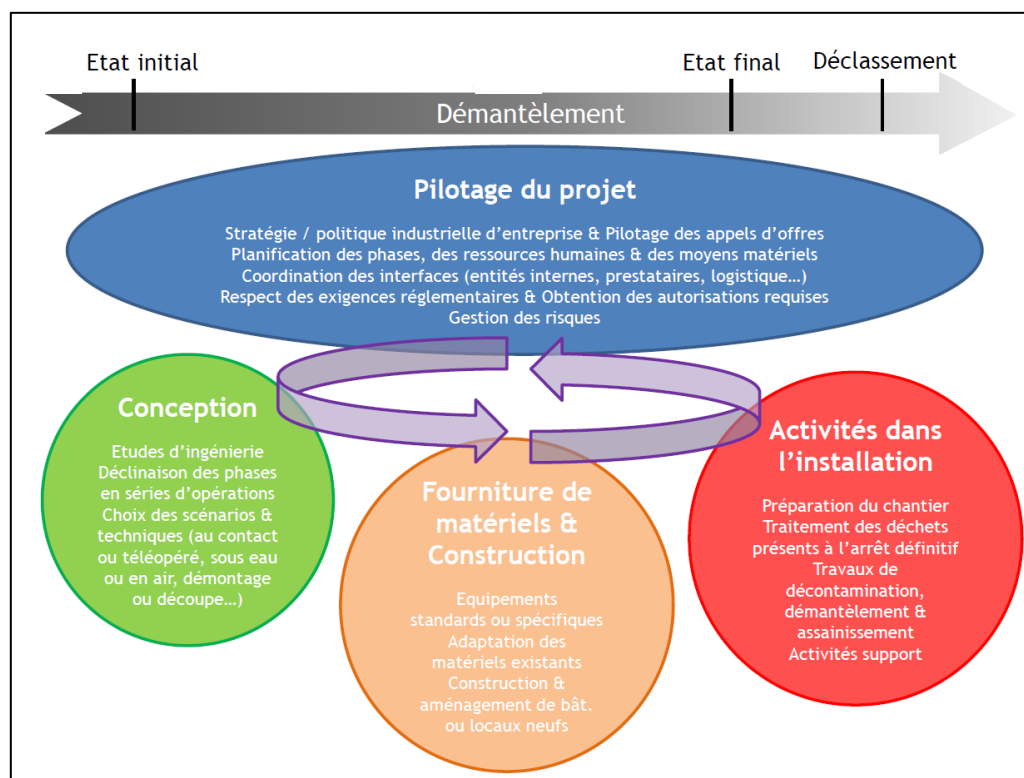


Figure 5.1 - Illustration de la complexité d'un projet de démantèlement (durée et multitudes des activités et acteurs)

Dans le cadre de la sous-traitance de l'exécution d'activités de démantèlement et de gestion des déchets et effluents, l'exploitant demeure responsable de la sûreté de l'installation. Il doit disposer des ressources nécessaires (en effectifs et compétences notamment) pour assurer pleinement ses responsabilités d'exploitant nucléaire.

5.1 Le cas du démantèlement des réacteurs d'EDF

La branche d'EDF regroupant les activités de production d'électricité par des moyens nucléaires et thermiques comporte une division de la production nucléaire (DPN), qui assure l'exploitation des centres nucléaires de production d'électricité (CNPE), une direction des projets déconstructions et déchets (DP2D), qui pilote en particulier les démantèlements et la gestion des déchets associés, et une division de l'ingénierie du parc, de la déconstruction et de l'environnement (DIPDE), qui réalise des activités d'ingénierie de support au maintien opérationnel des CNPE et au démantèlement des installations définitivement arrêtées.

La DP2D est le maître d'ouvrage des projets de démantèlement.

Pour les opérations de démantèlement, EDF fait appel à de nombreuses entreprises sous-traitantes dans les domaines de l'ingénierie, de la mécanique (découpe...), de la décontamination et de l'assainissement, du génie civil, du traitement des déchets...

Pour conduire les projets de démantèlement, l'organisation d'EDF fait intervenir de multiples entités et les interfaces sont nombreuses. La maîtrise des activités sous-traitées et la capitalisation du retour d'expérience, notamment des prestataires, constituent des enjeux importants. Le retour d'expérience doit concerner l'ensemble des aspects, tant techniques (ce qui inclut la sûreté, la radioprotection, la gestion des déchets et des effluents) qu'en matière d'organisation et de contractualisation des opérations.

Par ailleurs, à l'échelle française, le manque de visibilité sur le calendrier et le contenu des projets de démantèlement ne favorise pas l'anticipation et la préparation des industriels, notamment en termes de compétences et d'innovation technique.

5.2 La situation en Allemagne

Le contexte en Allemagne est caractérisé par l'arrêt définitif d'ici 2022 de tous les réacteurs de puissance et l'existence de plusieurs exploitants (E.ON, Vattenfall, RWE et EnBW - opérateurs privés), le démantèlement des centrales définitivement arrêtées lors de la réunification (sites de Greifswald et Rheinsberg) étant réalisé par un opérateur public (EWN).

S'agissant de l'encadrement du démantèlement des centrales et la gestion de leurs combustibles usés et déchets radioactifs, une loi clarifiant les rôles des acteurs est entrée en vigueur courant 2017. Les électriciens doivent réaliser (et financer) le démantèlement et le conditionnement des déchets produits (incluant le combustible usé) jusqu'à leur entreposage, le gouvernement fédéral assurant la gestion des déchets radioactifs entreposés jusqu'à leur stockage final. Ce nouveau cadre a pour objectif de laisser la responsabilité aux exploitants de démanteler leurs installations tout en leur donnant une visibilité malgré l'actuelle absence d'installation de stockage des déchets.

L'Allemagne dispose d'industriels du démantèlement, tels que Siempelkamp NIS, GNS (filiale d'E.ON, RWE et EnBW), EWN, Westinghouse EMEA, ASSYSTEM et FRAMATOME GmbH (groupe EDF), qui s'appuient localement sur des réseaux d'industriels.

Dans le contexte allemand, les électriciens et les industriels du secteur disposent d'une visibilité sur le démantèlement des réacteurs de puissance et les conditions de leur mise en œuvre, ce qui favorise l'anticipation pour les programmes de démantèlement à mener.

5.3 La situation aux USA

Aux Etats-Unis, les activités nucléaires se répartissent selon 2 secteurs - commercial et gouvernemental ; les réacteurs de puissance appartiennent au secteur commercial. La « Nuclear Regulatory Commission » (US/NRC) contrôle ce secteur et impose notamment que le démantèlement d'une installation soit terminé au plus tard 60 ans après l'arrêt de production.

Les principales spécificités américaines résident dans la multiplicité des électriciens privés qui exploitent les réacteurs de puissance, la gestion de la plupart de leurs déchets par des opérateurs privés (stockage compris) et la prise en charge de leurs combustibles usés (incluant la responsabilité et la propriété de celui-ci) par l'Etat fédéral via le « Department of Energy » (US/DOE).

Pour les réacteurs de puissance démantelés dans les années 1990 et 2000, leurs exploitants (Atomic Power Company, Southern California Edison, Portland General Electric...) ont gréé des équipes dédiées à ces projets et recouru à deux variantes principales pour les relations avec les prestataires. Soit l'électricien a endossé les rôles de maître d'ouvrage et de maître d'œuvre et, à ce titre, a sélectionné les sous-traitants puis les a pilotés directement pour les activités spécialisées (retrait et gestion des déchets d'amiante, décontamination et démantèlement du circuit primaire, démolition des structures...). Soit l'électricien, maître d'ouvrage, a recouru à un ensemblier, alors maître d'œuvre, qui a piloté plusieurs lots complémentaires de travaux, voire l'intégralité du projet, et géré l'intervention des sous-traitants. Dans un cas comme dans l'autre, les électriciens ont dû développer leurs ressources en démantèlement pour maîtriser le déroulement des activités (planification, préparation, exécution et retour d'expérience).

Pour les réacteurs de puissance actuellement en démantèlement, des changements d'exploitant nucléaire, des électriciens vers des entreprises spécialisées, sont observés de plus en plus fréquemment ; ces changements interviennent après l'arrêt définitif du réacteur et sont conditionnés à un accord de l'US/NRC. Les entreprises spécialisées prennent en charge le démantèlement du réacteur et la gestion des déchets correspondants (incluant transport et stockage), ainsi que la construction puis la mise en service de l'installation d'entreposage vers laquelle le combustible usé est transféré. Elles assurent également le pilotage des sous-traitants qui exécutent les activités spécialisées. **Ce type d'organisation ne correspond pas aux pratiques françaises.**

6 ENJEUX DU DEMANTELEMENT DES REACTEURS A EAU SOUS PRESSION

6.1 Modalités d'arrêt définitif et de démantèlement envisagées par EDF

Après l'arrêt d'un réacteur de type REP, la radioactivité reste essentiellement concentrée (> 95 %) dans les assemblages combustibles (AC) irradiés présents dans la cuve du réacteur et dans la piscine de désactivation. Cette radioactivité est telle qu'un refroidissement actif de l'eau dans laquelle les assemblages combustibles sont immergés doit être assuré (pour information, le dégagement thermique est d'environ 50 MW 1 h après l'arrêt d'un réacteur de 1 000 MWe ayant fonctionné 1 an en continu à pleine puissance). Le déchargement du combustible usé contenu dans la cuve (cœur) vers la piscine de désactivation s'effectue durant les jours qui suivent cet arrêt (cf. figure 6.1).

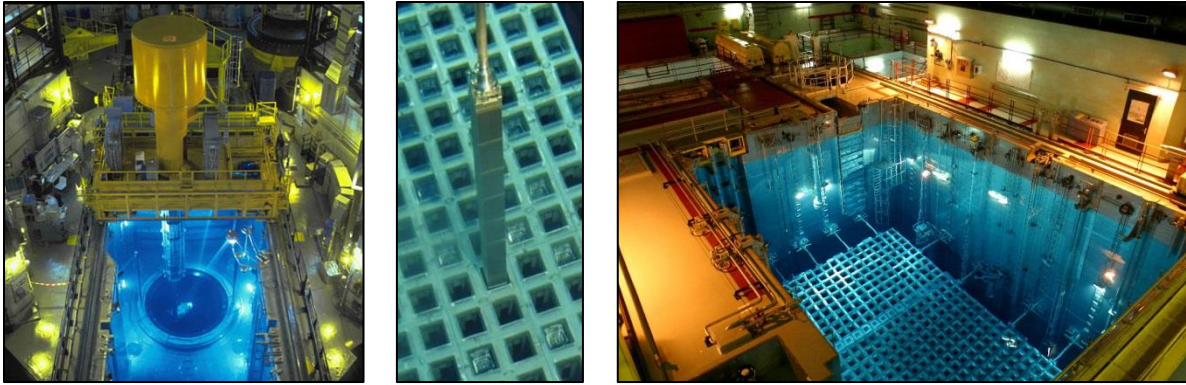


Figure 6.1 - Déchargement de la cuve, manutention d'un assemblage et piscine de désactivation (CNPE d'EDF)

La piscine de désactivation contient alors la totalité du combustible utilisé, soit le dernier cœur et tout ou partie du précédent (couramment entre 100 et 150 tonnes de métal lourd initial - tmlh, pour un réacteur de 1 000 MWe). Même si le dégagement thermique diminue fortement après quelques mois (atteinte de 2 à 3 MW pour l'ensemble du combustible utilisé), un refroidissement actif de la piscine de désactivation doit être maintenu tant que du combustible utilisé est présent. L'épuration mécanique et chimique de l'eau doit également être maintenue. De plus, la piscine de désactivation sert à entreposer les déchets rendus très radioactifs par le fonctionnement du réacteur (barres de commande, grappes poisons..., de catégorie moyenne activité à vie longue - MA-VL).

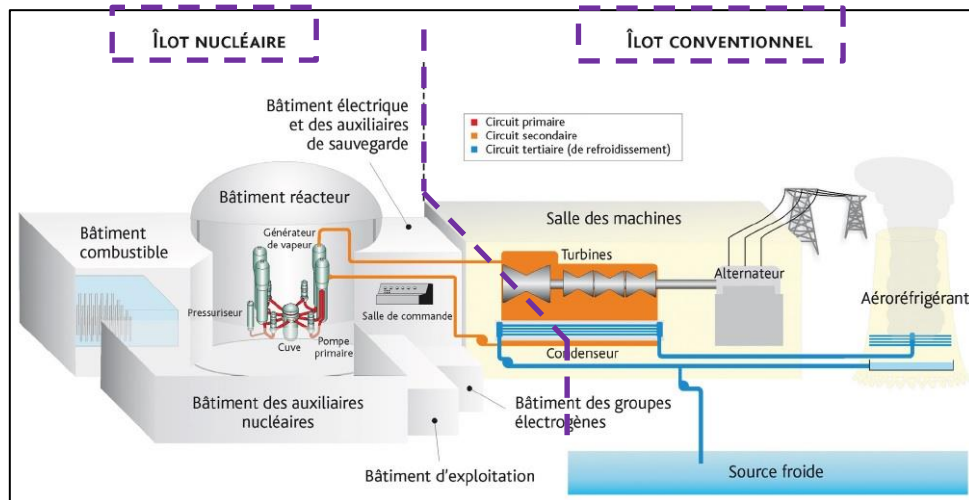


Figure 6.2 - Schéma descriptif d'un réacteur de type REP

Dans le cadre de l'arrêt définitif et du démantèlement d'un réacteur de puissance, le combustible utilisé et les déchets de fonctionnement encore présents doivent être évacués prioritairement. La stratégie actuelle d'EDF est d'évacuer le combustible utilisé et, si possible, les déchets de fonctionnement MA-VL durant l'étape de transition avant le démantèlement. Ces opérations effectuées, les systèmes de refroidissement des eaux de piscine ne seraient plus requis quelles que soient les situations envisageables (normale, dégradée, incidentelle et accidentelle). Ce n'est pas nécessairement le cas pour les systèmes d'épuration, notamment s'ils doivent être réutilisés lors d'opérations de démantèlement sous eau prévues dans les piscines.

Après l'évacuation du combustible usé et des déchets de fonctionnement, la radioactivité résiduelle résulte de l'activation des matériaux et de la contamination (fixée ou labile) des structures et des matériels de l'îlot nucléaire (cf. figure 6.2) issues du fonctionnement du réacteur.

Cette radioactivité se localise essentiellement dans le bâtiment du réacteur (BR) qui contient les composants du circuit primaire principal (CPP) tels que la cuve et ses internes, les générateurs de vapeur (GV) et le pressuriseur, mais également dans le bâtiment du combustible (BK), le bâtiment des auxiliaires nucléaires (BAN), le bâtiment électrique et des auxiliaires de sauvegarde (BAS/BL), ainsi que dans les ouvrages de rejet des effluents radioactifs. Sauf événement particulier, les ouvrages de l'îlot conventionnel, tels que la salle des machines (SDM), ne sont pas contaminés, de même que les sols situés à l'aplomb et en périphérie du réacteur.

Pour démanteler ses réacteurs de type REP, les orientations actuelles d'EDF considèrent un site dont tous les réacteurs sont arrêtés successivement.

Durant la préparation du démantèlement, les salles des machines des deux premiers réacteurs arrêtés (qui peuvent être contiguës) sont réaménagées pour la gestion des déchets de démantèlement (traitement, conditionnement et entreposage) ; les éventuelles autres salles des machines (un site peut comporter 2, 4 ou 6 réacteurs) sont démantelées en même temps que les bâtiments nucléaires.

Le démantèlement des principaux systèmes a lieu successivement dans chacun des réacteurs du site.

Le démantèlement dans le bâtiment du réacteur débute par celui des matériels implantés au-dessus du niveau de la piscine du réacteur, se poursuit par celui des boucles du circuit primaire principal puis par la cuve, avec son couvercle et ses internes, et s'achève par les matériels implantés au-dessous du niveau de la piscine du réacteur.

Le démantèlement dans les autres bâtiments nucléaires s'effectue en parallèle de celui réalisé dans le bâtiment du réacteur. Pour certains circuits (PTR notamment, qui assure l'épuration de l'eau des piscines), le démantèlement des boucles du circuit primaire principal et de la cuve doit être achevé pour pouvoir les démanteler, en raison du scénario de démantèlement sous eau de la cuve et de ses internes.

Aux bâtiments de l'îlot nucléaire, s'ajoutent le bâtiment de traitement des effluents (BTE) et ceux d'entreposage des déchets, qui sont communs aux réacteurs d'un même CNPE. Ces bâtiments assurent des fonctions qui peuvent être réutilisées dans le cadre du démantèlement.

L'assainissement des locaux d'un bâtiment nucléaire intervient après le démantèlement de la totalité des matériels qui y sont implantés. Si nécessaire, les sols pollués devront être assainis. Finalement, EDF envisage la démolition des bâtiments jusqu'au niveau -1 m par rapport à la plateforme d'implantation des réacteurs puis la réhabilitation du site ; EDF vise un usage industriel pour les sites dont les installations nucléaires auront été démantelées.

6.2 Quelques spécificités des CNPE français

En France, les 58 réacteurs de puissance en fonctionnement, tous de type REP, sont exploités exclusivement par EDF.

Géographiquement répartis dans 19 CNPE, ces réacteurs bénéficient de conceptions standardisées qui sont déclinées selon 3 niveaux de puissance dénommés « paliers » (900 MWe, 1 300 MWe et 1 450 MWe) et 5 architectures générales de bâtiments et circuits. Ces conceptions distinguent les paires jumelées d'unités 900 MWe (CP0/CP1 et CP2 - cf. figures 6.3 à 6.5) et les unités simples 1 300 et 1 450 MWe (P4, P'4 et N4 - cf. figures 6.3 et 6.6).

A l'exception de Flamanville (construction d'une unité REP de conception EPR) et de Gravelines (exploitation de 6 unités REP 900 MWe), chacun des CNPE comporte 2 ou 4 réacteurs de mêmes palier et architecture générale, mis en service à des dates assez proches (au plus 3 ans séparent deux mises en service consécutives d'unités).

Pour une paire jumelée d'unités REP 900 MWe (cas des 2 réacteurs de la centrale de Fessenheim), qui comporte de nombreux circuits communs (ceux présents dans le bâtiment des auxiliaires nucléaires notamment), EDF considère que le démantèlement d'une unité ne peut pas débuter tant que son unité jumelle est en fonctionnement.

Dans le cas contraire, selon EDF, la situation serait de nature à occasionner des risques particuliers liés aux circuits communs aux deux unités (par exemple, découpe ou retrait erroné de matériels concourant à la sûreté de celle en fonctionnement).

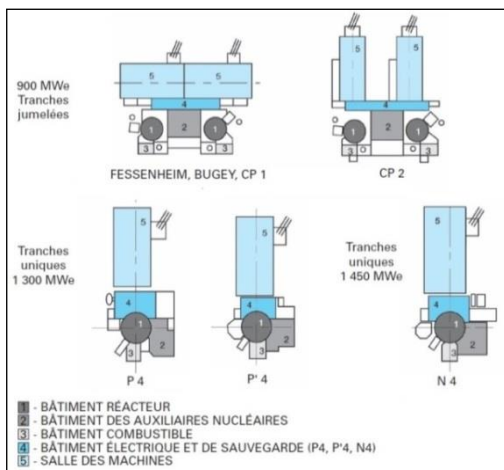


Figure 6.3 - Architecture générale par palier de puissance



Figure 6.4 - Unités REP 900 MWe CP0 (CNPE de Fessenheim)



Figure 6.6 - Unités REP 1 300 MWe P4 (CNPE de Paluel)



Figure 6.5 - Unités REP 900 MWe CP1 (CNPE de Dampierre)

EDF indique vouloir mettre à profit la standardisation des conceptions de réacteur pour standardiser leur démantèlement. Pour les travaux les plus complexes qui concernent les composants les plus radioactifs (cuve, internes et boucles du circuit primaire principal), leurs études et réalisations pourront faire l'objet de chantiers pilotes dont le retour d'expérience bénéficiera aux chantiers suivants.

Une telle approche favoriserait une amélioration itérative de la conduite des procédés de démantèlement et de la gestion des chantiers dans l'installation à démanteler, ainsi qu'une formation adaptée des opérateurs (d'EDF ou de ses prestataires), donc une meilleure maîtrise des activités et des risques.

6.3 Stratégie, état final et données à collecter

Dans la continuité de la décision prise en 2001 de démanteler ses réacteurs de première génération sans période d'attente supplémentaire, EDF a révisé, dans le courant des années 2000, ses études pour démanteler les réacteurs de type REP sans interruption volontaire des opérations durant une période multi-décennale (antérieurement, une attente de 25 à 50 ans était envisagée avant de démanteler les parties les plus radioactives).

Cela conduit EDF à retenir, pour une paire jumelée d'unités REP 900 MWe, une phase de transition entre le fonctionnement et le démantèlement de l'ordre de 5 ans et un déroulement des travaux de démantèlement sur environ 20 ans. Cette durée pour atteindre l'état final visé intègre la démolition des bâtiments et la réhabilitation du site en vue d'un usage industriel postérieur (le site restant propriété d'EDF).

Les durées prévues par EDF sont cohérentes avec le retour d'expérience international.

Le démantèlement des réacteurs d'EDF de type REP ne met pas en évidence de difficulté technique rédhibitoire : disponibilité des techniques, des compétences et du tissu industriel, y compris pour la gestion des déchets, conception des installations favorable. Le retour d'expérience, notamment international, confirme ce point. Il s'agit toutefois de chantiers longs et complexes, porteurs de risques, qui nécessitent d'être traités comme des projets industriels.

Dans le cadre de l'arrêt de production d'un réacteur, une préparation efficace puis un enclenchement immédiat du démantèlement, suivis d'un déroulement ininterrompu des opérations jusqu'à l'atteinte de l'état final (dynamique de projet), permettent de bénéficier au mieux des compétences et connaissances du personnel ayant participé à son fonctionnement. En effet, **la collecte, la conservation et l'accès aux données (et informations) acquises lors de la conception, de la construction et du fonctionnement des réacteurs, ainsi que leurs consolidation et enrichissement durant le démantèlement, constituent un enjeu important, car ils permettent de se forger l'image la plus correcte possible de l'état initial de l'installation et du site pour engager le démantèlement, réduire les incertitudes et maîtriser les opérations jusqu'à l'atteinte de l'état final visé. Cette connaissance de l'état initial est, en effet, un élément essentiel dans le choix de la stratégie de démantèlement.**

A cet égard, tirant les enseignements des difficultés d'accès aux données pour les démantèlements actuels, EDF a enclenché en 2010 un projet visant à mettre au point une collecte systématique et largement automatisée des données et informations qui intéressent le démantèlement de ses réacteurs de type REP. Le système de collecte, qui s'insère dans l'outil global de gestion des informations d'EDF, est maintenant en cours de déploiement sur les CNPE et devrait être opérationnel pour la totalité d'entre eux vers 2020.

Enfin, les innovations techniques (stockage numérique centralisé de tous les éléments d'un projet, simulation 3D/4D, réalité augmentée, réalité virtuelle, robotique...) pour préparer puis mener les opérations, notamment à distance, permettent d'améliorer la prise en compte de la radioprotection des travailleurs dans le cadre d'un démantèlement immédiat.

Ces innovations permettent également d'améliorer en amont la caractérisation de l'environnement des interventions, ainsi que l'étude et la mise au point de celles-ci, afin de les rendre plus performantes, fiables et sûrs. Les innovations peuvent aussi être de natures organisationnelle et contractuelle (évolution vers des relations plus collaboratives et partenariales, limitation des interfaces et organisation mieux adaptée à la gestion de projets complexes).

6.4 Préparation du démantèlement et état initial

Après l'arrêt de production d'un réacteur, EDF prévoit de réaliser différentes opérations avant de débiter le démantèlement proprement dit.

Parmi ces opérations, celles déjà évoquées concernent l'évacuation du combustible usé et des déchets de fonctionnement, ainsi que le réaménagement de la salle des machines pour la gestion des déchets. S'y ajoutent, selon EDF, le démontage des matériels conventionnels pouvant être réutilisés, la création d'aire d'entreposage et l'aménagement de locaux pour la gestion des déchets, la rénovation ou l'adaptation des utilités (alimentation électrique, fourniture des fluides...), la vidange des circuits de procédé, le retrait des calorifuges, des caractérisations « intrusives » et la décontamination poussée des circuits (circuit primaire principal compris).

Après la réalisation de ces opérations, le réacteur atteint son état initial de démantèlement.

Le combustible usé étant susceptible d'engendrer les conséquences les plus importantes en cas d'accident, son évacuation du réacteur et du site est réalisée en priorité. Dans une moindre mesure, cela concerne également les déchets de fonctionnement les plus radioactifs (MA-VL).

Dans la plupart des pays européens, Allemagne notamment, l'évacuation du combustible usé préalablement au démantèlement du réacteur est la pratique. Ce n'est pas le cas aux USA où, pour les réacteurs de type REP démantelés jusqu'alors, l'évacuation du combustible usé et les travaux de démantèlement ont été menés en parallèle.

En Allemagne comme aux USA, le combustible usé est souvent transféré vers une installation d'entreposage construite à proximité du réacteur (cf. figure 6.7).

En France, pour chacun des réacteurs arrêtés, EDF estime être en mesure d'évacuer en 3 ans le combustible usé vers les exutoires centralisés de gestion (usines ORANO de La Hague - cf. figure 6.8 - auxquelles pourrait s'ajouter une piscine centralisée construite par EDF à l'horizon 2030).

A cet égard, un panorama des entreposages de combustibles usés de par le monde ainsi que les concepts et enjeux de sûreté associés sont présentés dans le rapport IRSN n°2018-00003 de juin 2018.



Figure 6.7 - Entreposage du combustible usé de la centrale démantelée de Trojan (USA)



Figure 6.8 - Entreposage du combustible usé à La Hague

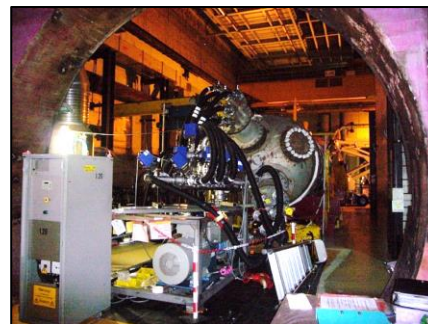


Figure 6.9 - Décontamination après dépose d'un GV du réacteur Chooz A

S'agissant des déchets de fonctionnement MA-VL, leur évacuation vers l'installation ICEDA, implantée sur le site du Bugey et dont le fonctionnement industriel devrait débuter courant 2020, pourrait avoir lieu en amont de l'arrêt de production du réacteur, durant l'étape de transition ou en début de démantèlement.

En tout état de cause, de façon générale et particulièrement pour le combustible usé ou les déchets MA-VL, les exigences de sûreté adaptées aux risques doivent être maintenues tant que ceux-ci sont présents.

S'agissant de la décontamination poussée des circuits, le retour d'expérience international montre qu'elle est largement pratiquée préalablement au démantèlement des réacteurs de types REP et REB. L'objectif essentiel de cette décontamination, qui implique généralement la mise en œuvre de substances chimiques et la création de déchets liquides, est de diminuer les débits de dose dans les locaux afin de limiter l'exposition externe des travailleurs menant des activités à proximité des sources de rayonnement.

La décontamination pour rendre moins radioactifs les déchets en vue de leur stockage se pratique davantage, durant le démantèlement, sur des composants déposés (par exemple les générateurs de vapeur du réacteur Chooz A, unité REP 305 MWe - cf. figure 6.9) ou des parties découpées de composants.

En tout état de cause, les modalités de décontamination des circuits (ou des composants déposés) doivent intégrer la recherche du meilleur compromis entre la production de déchets (solides et liquides), le rejet d'effluents (liquides et gazeux) dans l'environnement et l'exposition aux rayonnements ionisants des travailleurs.

6.5 Démantèlement

Les installations nucléaires de base autres que les stockages de déchets radioactifs font l'objet d'un plan de démantèlement qui présente les principes et les étapes envisagés pour leur démantèlement et la remise en état du site. Joint à la demande de création de l'installation, ce plan est mis à jour régulièrement.

Pour démanteler un réacteur de puissance, différents systèmes annexes sont nécessaires, voire requis au regard de la sûreté et de la radioprotection ; il s'agit notamment des circuits d'air, d'eau et de transfert des effluents radioactifs et des systèmes de ventilation, d'alimentation électrique, de détection et d'extinction incendie, de contrôle / commande et de communication ainsi que des moyens de manutention et de gestion des déchets. Ces systèmes et moyens sont généralement présents dans le réacteur au moment de son arrêt définitif et peuvent être, soit réutilisés (après une éventuelle rénovation, adaptation ou modification), soit remplacés par des systèmes neufs dimensionnés pour les besoins de démantèlement.

Les systèmes en place ont pu s'altérer (vieillesse) durant le fonctionnement (accessoires de manutention par exemple) ou peuvent être atteints d'obsolescence technologique (matériels électroniques et informatiques par exemple) à l'échéance de l'arrêt définitif du réacteur ou de son démantèlement.

Il convient de rappeler que le fonctionnement puis le démantèlement d'un réacteur de puissance peut s'étaler sur 70 ans et plus. Aussi, la réutilisation de ces systèmes doit être anticipée et leur adéquation aux activités prévues (conformité technique) doit être vérifiée suffisamment en amont ; cela peut être fait à l'occasion de l'examen de sûreté réalisé dans le cadre de la demande de démantèlement de l'installation.

La mise en place de systèmes neufs permet d'éviter ces difficultés et favorise, d'une part la standardisation et la mutualisation des systèmes, d'autre part une conduite du démantèlement par zones géographiques successives plutôt que par systèmes successifs. A cet égard, ce second mode de conduite nécessite généralement d'effectuer un repérage des matériels à conserver lors des travaux de démantèlement, notamment ceux requis pour la sûreté et la radioprotection. Le retour d'expérience montre que ce repérage peut être source d'erreurs dans sa réalisation ou son interprétation, pouvant conduire à des disséminations de substances radioactives dans l'installation ou à la perte temporaire d'une fonction active de sûreté. La réalité augmentée offre des possibilités pour limiter ce type d'erreurs, mais son usage reste encore limité dans le secteur du démantèlement des installations nucléaires.

Lors du démantèlement d'un réacteur de type REP, les principaux enjeux en termes de complexité et de sûreté des opérations, en incluant la radioprotection des travailleurs et la gestion des déchets, concernent le circuit primaire principal (cf. figures 6.10 et 6.11), qui concentre la majorité de la radioactivité résiduelle.

Par ailleurs, en termes de succession des lots d'opérations (phasage), le démantèlement peut être conduit schématiquement selon trois options : en débutant par les parties les moins radioactives et en allant vers celles les plus radioactives (logique « froid vers chaud »), l'inverse (logique « chaud vers froid ») ou en conjuguant les deux options précédentes.

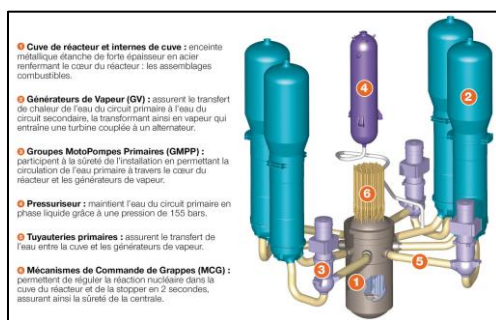


Figure 6.10 - Schéma descriptif du CPP

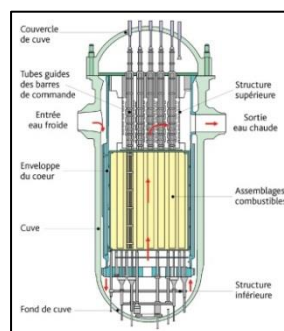


Figure 6.11 - Coupe descriptive de la cuve et ses internes

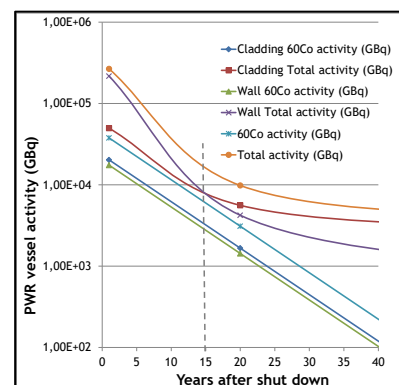


Figure 6.12 - Courbes de décroissance radioactive d'une cuve activée

La première option permet un entraînement des équipes d'intervention lors des chantiers les plus simples et de bénéficier d'une décroissance radioactive significative pour le démantèlement du circuit primaire principal, qui intervient alors environ 15 ans après l'arrêt de production (cf. figure 6.12 concernant la cuve).

La deuxième option est proposée plutôt par les industriels spécialisés dont les équipes sont formés à la conduite d'opérations complexes, l'évacuation dès le début des composants du circuit primaire principal permettant une diminution significative des débits de dose dans les locaux du bâtiment du réacteur pour les opérations suivantes.

La troisième option retient un déroulement d'opérations dans plusieurs endroits du réacteur en même temps et tient compte de la nécessité d'effectuer des aménagements dans le bâtiment du réacteur pour démanteler les composants du circuit primaire principal.

Au regard de la sûreté, de la radioprotection et de la gestion des déchets, seule une analyse détaillée permet de définir le meilleur compromis.

Pour le démantèlement des composants du circuit primaire principal, plusieurs options sont envisageables en termes de scénarios et de techniques (cf. figures 6.13 et 6.14). Ainsi, les composants peuvent être retirés puis évacués monoblocs du réacteur pour être éliminés en l'état comme déchets, ou découpés sur place puis évacués en morceaux avec ou sans conditionnement additionnel selon leur radioactivité (déchets TFA vs. FMA-VC), ou encore retirés puis découpés dans un autre bâtiment, une autre installation, voire sur un autre site. Les opérations peuvent être conduites dans leur intégralité dans l'air ambiant des zones de travaux ou pour certaines d'entre elles sous eau, qui assure alors une protection radiologique pour démanteler les composants les plus radioactifs (internes de cuve notamment). De plus, les découpes d'un composant peuvent être effectuées avec un outil mécanique (scie, cisaille, jet d'eau...), thermique (torche à plasma, chalumeau, laser...) ou utiliser plusieurs techniques.



Figure 6.13 - GV évacué monobloc d'une des unités de Zion (USA). GV transporté monobloc depuis le CNPE de Chozy et stocké en l'état dans le Cires de Morvilliers (France). GV découpé à la centrale de Greifswald (Allemagne)

Au regard de la sûreté, de la radioprotection et de la gestion des déchets, le retour d'expérience disponible ne dégage aucune option préférable. **Dans ce cas également, seule une analyse détaillée permet d'effectuer des choix qui intègrent l'ensemble des exigences à prendre en compte par l'exploitant.**

Pour le démantèlement de ses réacteurs de type REP, EDF peut retenir un phasage, une planification, des scénarios et des techniques identiques pour tous, ou panacher plusieurs options, telles que celles évoquées précédemment, à l'échelle du parc, voire d'un CNPE. **Le recours à une solution identique pour tous les réacteurs présente des avantages en termes de standardisation des opérations, incluant les matériels utilisés et les modalités d'intervention, de formation des opérateurs et de maîtrise des activités et des risques qu'elles occasionnent.**



Figure 6.14 - Cuve extraite monobloc d'une des unités de Greifswald (Allemagne). Poste de découpe à sec de la cuve du réacteur Stade (Allemagne). Découpe sous eau de la cuve du réacteur José Cabrera (Espagne)

En tout état de cause, **le retour d'expérience des démantèlements des réacteurs d'EDF (notamment le réacteur Chooz A et ultérieurement les unités du CNPE de Fessenheim) et le retour d'expérience international doivent être mis à profit pour la définition de la stratégie et des opérations de démantèlement.**

6.6 Gestion des déchets

Le démantèlement d'un réacteur de puissance entraîne la production de déchets solides et liquides pouvant être différents de ceux produits lors de son fonctionnement et dont les quantités peuvent être notablement plus importantes.

La gestion de ces déchets doit viser à en limiter les quantités, à définir les traitements à mettre en œuvre et à en déterminer le devenir, compte tenu de leurs caractéristiques radioactives et chimiques. A cet égard, différentes options sont envisageables.

Depuis le site de démantèlement, les déchets peuvent être évacués bruts, partiellement traités (décontaminés, découpés, compactés...) ou prêts à être stockés. Sur le site, leur gestion peut s'effectuer avec les moyens existants réutilisés à l'identique ou adaptés au regard des caractéristiques et des flux à considérer, ou encore avec des moyens spécifiquement créés pour le démantèlement.

Hors du site, les déchets peuvent être traités dans une autre installation appartenant à l'exploitant (installation ICEDA pour EDF) ou à un opérateur spécialisé, implanté en France (usine CENTRACO) ou à l'étranger (usine CYCLIFE en Suède), pour finalement être conditionnés en vue d'un stockage dans une des installations de l'ANDRA existantes (CIRES et CSA) ou en projet (CIGEO).

Au regard de la sûreté, de la radioprotection et de la gestion des déchets, seule une analyse détaillée permet d'effectuer des choix qui intègrent l'ensemble des exigences à prendre en compte par l'exploitant.

Les quantités de déchets produits par le démantèlement d'un réacteur de type REP dépendent de différents facteurs tels que la conception du réacteur, les modalités de gestion durant le démantèlement et le tissu industriel accessible pour leur recyclage ou élimination, en lien avec la classification des déchets et la réglementation environnementale en vigueur dans le pays concerné. A cet égard, une comparaison peut être faite entre la France, l'Allemagne et les États-Unis concernant les déchets bruts qui résultent du démantèlement des structures et des matériels de réacteurs de type REP équivalents.

En France, pour une unité REP 900 MWe CP1, EDF évalue à entre 7 000 et 8 000 t la masse de déchets radioactifs bruts pour une masse totale de structures et matériels d'environ 320 000 t (cf. figure 6.15).

En Allemagne, les estimations sont de 3 400 à 4 700 t de déchets radioactifs bruts pour une masse totale de structures et matériels d'environ 600 000 t (cf. figure 6.15), auxquels s'ajoutent 600 à 800 t de métaux recyclés dans l'industrie nucléaire. La différence de masse de structures et de matériels est liée aux conceptions des réacteurs (unité jumelée vs unité simple, simple-enceinte vs. double-enceinte...).

La différence de production de déchets radioactifs s'explique essentiellement par la pratique en Allemagne de la « libération » des déchets, combinée à la mise en service, qui aujourd'hui n'est pas prévue avant 2022, d'une installation de stockage des déchets radioactifs FAMA à profondeur « intermédiaire », qui conduit les exploitants à les décontaminer massivement (généralement manuellement - cf. figure 6.16) ou à les entreposer pour décroissance radioactive, afin de diminuer le plus possible les quantités à stocker.

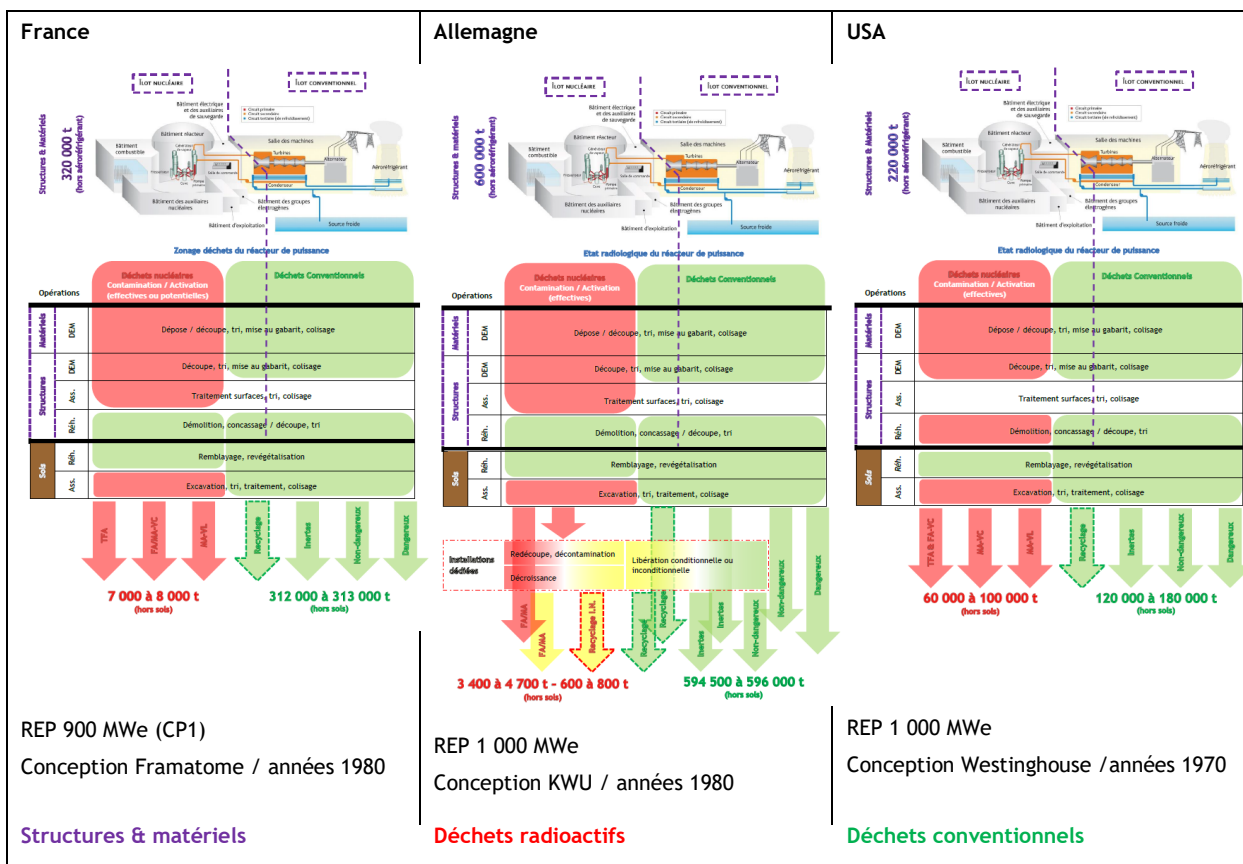


Figure 6.15 - Comparaison de la production de déchets bruts lors du démantèlement d'un réacteur de type REP



Figure 6.16 - Opérations de décontamination mécanique ou chimique effectuées à la centrale de Greifswald (Allemagne)

A cet égard, la libération des déchets consiste à considérer, en dessous d'un certain niveau de radioactivité, que le déchet est « conventionnel » et peut être géré en tant que tel (valorisation notamment). La France ne pratique pas la libération des déchets, mais dispose de capacités opérationnelles de stockage en surface exploitées par l'ANDRA (installations CIREs pour les TFA et CSA pour les FA/MA-VC - capacités volumiques respectives de 900 000 m³ et de 1 000 000 de m³).

Aux États-Unis, les estimations sont de 60 000 à 100 000 t de déchets radioactifs bruts pour une masse totale de structures et matériels d'environ 220 000 t (cf. figure 6.15).

Cette grande différence de production de déchets radioactifs par rapport à la France et à l'Allemagne s'explique essentiellement par la stratégie qui consiste à limiter l'assainissement des bâtiments pour réduire le délai d'atteinte de l'état final et ainsi réduire les coûts. Pour des projets où les bâtiments font l'objet d'un assainissement plus étendu, les estimations sont comprises entre 15 000 et 20 000 t de déchets radioactifs bruts, ce qui reste encore élevé par rapport aux pays européens. La plupart des déchets sont de catégories TFA et FA-VC et, à ce titre, sont éliminés dans des centres de stockage de surface.

Lors du démantèlement d'une unité REP de 900 MWe d'EDF, les déchets radioactifs sont essentiellement métalliques ou à base de béton ; ils se répartissent entre des TFA (environ 65 %), des FA/MA-VC (environ 35 %) et des MA-VL (inférieur à 1 %).

Ces quantités sont à mettre au regard de la durée des opérations (environ 20 ans) pour estimer les flux à gérer et à évacuer. **En tout état de cause, la disponibilité de filières dimensionnées pour gérer sur et hors site les déchets présents à l'arrêt du réacteur et produits lors de son démantèlement doit être anticipée.**

7 CONCLUSION

Le démantèlement d'une installation nucléaire est une activité industrielle à part entière, s'appuyant sur des compétences, connaissances et organisations spécifiques.

Les grandes étapes du démantèlement d'un réacteur sont :

- l'évacuation des matières et des déchets encore présents dans l'installation à la fin du fonctionnement, en utilisant généralement les équipements utilisés lors de la période de fonctionnement ;
- le démontage, la découpe et l'évacuation en tant que déchets des matériels (équipements du procédé et leurs périphériques), éventuellement après une décontamination. Ces opérations nécessitent la mise en place préalable de nouveaux équipements ;
- l'assainissement des locaux et la dépollution des sols le cas échéant ;
- la réhabilitation du site incluant le cas échéant la démolition des bâtiments de l'installation.

Si les premières opérations d'un démantèlement sont proches de celles réalisées lorsque le réacteur est en fonctionnement (évacuation des assemblages combustibles et des déchets de fonctionnement, démontage de certains équipements), elles s'en écartent notablement au fur et à mesure de l'avancement des travaux (découpes d'équipements spécifiques, assainissement de structure et de sols afin d'atteindre l'état final visé).

De manière concomitante, les risques évoluent ; les risques pour l'environnement diminuent, les risques d'origine non nucléaire s'accroissent (risques d'incendie, d'origine électrique, liés aux manutentions...) et les risques pour les opérateurs sont différents du fait du type des travaux réalisés, pouvant nécessiter l'intervention d'opérateurs à proximité des équipements à démonter.

Le démantèlement recouvre ainsi un ensemble d'opérations très variées, de natures différentes et pouvant se dérouler simultanément dans de nombreuses parties de l'installation, induisant notamment des risques liés à la co-activité. De plus, ces opérations, qui s'étalent sur une longue période, sont réalisées avec une organisation et des équipes différentes de celles en place lors du fonctionnement. Les facteurs organisationnels et humains constituent donc un enjeu d'une importance toute particulière. Sur ce point, la standardisation du démantèlement des réacteurs d'EDF et la mutualisation des moyens nécessaires sont des éléments favorables.

S'agissant des réacteurs à eau sous pression, le retour d'expérience acquis, tant en France qu'à l'international, montre que leur démantèlement est techniquement faisable, dans des délais maîtrisés, en utilisant des techniques aujourd'hui connues et éprouvées. En outre, des opérations de remplacement d'équipements lourds réalisées par le passé pour les réacteurs actuellement en exploitation (générateurs de vapeurs, couvercles de cuve notamment) ont apporté des éléments de retour d'expérience importants. Ainsi, de par le monde, des démantèlements complets de ce type d'installation ont déjà été réalisés. Par ailleurs, en France, le démantèlement, en cours, du réacteur Chooz A d'EDF, situé dans les Ardennes, n'a pas mis en évidence de difficulté majeure. A cet égard, il se distingue du démantèlement des réacteurs uranium naturel graphite gaz (UNGG) d'EDF, dont la conception rend leur démantèlement complexe et requiert des développements importants.

Le retour d'expérience en France et à l'international montre que les exploitants sous-traitent de nombreuses opérations auprès d'industriels spécialisés. Ce recours à la sous-traitance ne se distingue toutefois pas, sur le principe, de celle mise en œuvre lors du fonctionnement des réacteurs (arrêts de tranche, remplacement de gros équipements...). La maîtrise de l'accroissement de cette sous-traitance et la disponibilité de sous-traitants qualifiés sont des enjeux majeurs du point de vue de la sûreté et de la radioprotection. En particulier, la disponibilité de moyens suffisants, en effectifs et en compétences, ainsi que d'une organisation et d'une gestion, notamment contractuelle, adaptées pour encadrer cette sous-traitance est un enjeu essentiel en termes de sûreté nucléaire et de radioprotection.

La capacité des industriels (notamment en termes de compétences, d'organisation et de moyens techniques) à répondre à l'accroissement du nombre de réacteurs à démanteler est liée à une visibilité suffisante du marché du démantèlement, et donc tout particulièrement des programmes à venir.

Le démantèlement d'une installation, qui doit être géré comme un projet industriel, s'appuie sur des installations supports et des moyens de transport (notamment pour la découpe de matériels, l'entreposage, le traitement et le conditionnement des déchets, le traitement des effluents...). La maîtrise des éléments nécessaires à la bonne réalisation des opérations de démantèlement, en termes de sûreté ou de gestion de projet, est donc un enjeu important. Cela concerne tout particulièrement les capacités et disponibilités de ces installations supports et moyens de transport, d'autant plus s'ils ne sont pas spécifiques à ce démantèlement.

La connaissance de l'état de l'installation au moment de son arrêt est un élément structurant pour préparer le démantèlement à réaliser (opérations à réaliser, condition d'intervention, planification...). De même, la définition de l'état final visé est un élément à définir au plus tôt. La collecte, la conservation et l'accès aux informations acquises lors de la conception, de la construction et du fonctionnement et leur enrichissement durant le démantèlement constituent un enjeu important. Plus généralement, la constitution et la valorisation du retour d'expérience des démantèlements sont à organiser particulièrement.

Le démantèlement d'une installation implique la production de déchets solides et liquides, le rejet d'effluents liquides et gazeux et une exposition aux rayonnements ionisants des travailleurs. Les choix des procédés et des méthodes d'assainissement constituent de ce point de vue un enjeu particulier.

En conclusion, du point de vue de la sûreté nucléaire et de la radioprotection, les enjeux exposés ci-dessus doivent être pris en compte dans la préparation et la réalisation des projets de démantèlement.

Glossaire

Catégories de déchets

FAMA : faible et moyenne activité

FMA-VC (ou **FA/MA-VC**) : faible et moyenne activité à vie courte

FA-VL : faible activité à vie longue

HA : haute activité

MA-VL : moyenne activité à vie longue

TFA : très faible activité

CIRES : centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage

Composants (ou systèmes) d'un réacteur à eau sous pression

CPP : circuit primaire principal

GV : générateur de vapeur

PTR : circuit de réfrigération et de purification de l'eau des piscines

CSA : centre de stockage de l'Aube

CIGEO : centre industriel de stockage géologique

Types de réacteurs

AGR : Advanced gas reactor

EPR : European pressurised reactor

GCR : gas cooled reactor

LWGR : light water graphite reactor

PHWR : pressurised heavy water reactor

REP (ou **PWR**) : réacteur à eau sous pression

REB (ou **BWR**) : réacteur à eau bouillante

RNR : réacteur à neutrons rapides

UNGG : uranium naturel graphite gaz

Crédit photos

Photothèque EDF (figures 6.1, 6.4, 6.5, 6.6, 6.9 et 6.13) ; photothèque ENRESA (figure 6.14) ; photothèque E.ON (figures 3.4 et 6.14) ; photothèque EWN (figures 6.13, 6.14 et 6.16) ; photothèque FRAMATOME (figures 6.9, 6.10 et 6.11) ; photothèque IRSN (figure 4.1) ; photothèque ORANO (figures 6.8) ; photothèque Portland General Electric (figure 6.7) ; photothèque Zion Solutions (figures 3.3 et 6.13)