

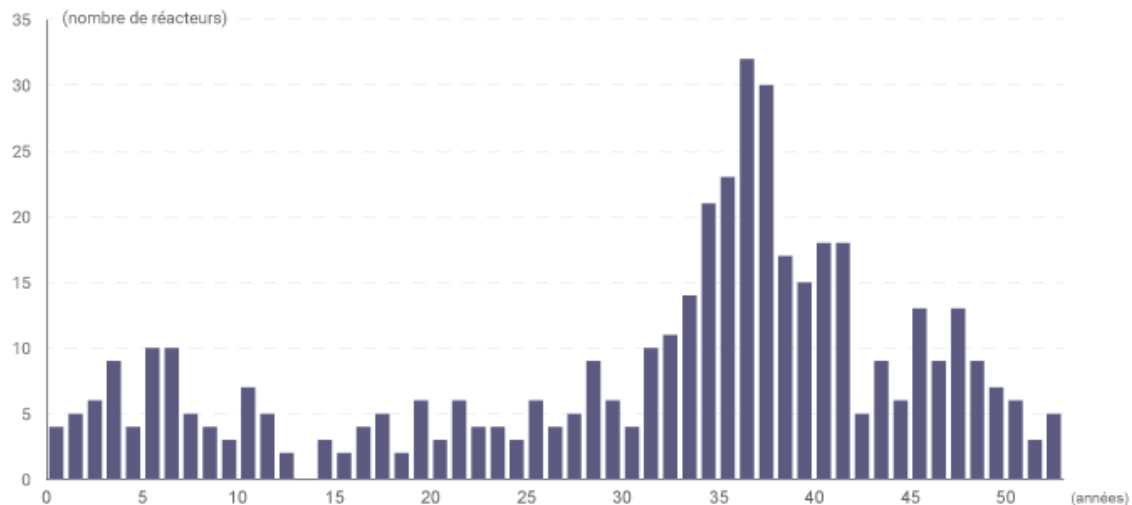
Centrales nucléaires de type REP

Jean-Michel Delbecq, Dominique Grenèche
Experts auprès de PNC-France

1. Panorama général

Le parc nucléaire mondial en activité, proche de 395 GW¹, dont 61 en France, s'est développé sur plus de 50 ans. Il est massivement composé de réacteurs à eau légère, pressurisée (les REP ou PWR en anglais) et à eau bouillante (les REB ou BWR en anglais). Il comprend 442² unités, dont 56 en France.

C'est aux réacteurs REP que nous nous intéressons, car c'est la filière que nous exploitons.



Les réacteurs opérationnels en 2021 selon l'AIEA

En septembre 2021, selon l'AIEA, 197 réacteurs électrogènes sont définitivement arrêtés dans le monde : leur situation est la suivante :

Réacteurs arrêtés	Réacteurs en démantèlement	Réacteurs démantelés	REP arrêtés	REP en démantèlement	REP démantelés
197	138	20	61	54	7

Les démantèlements dans le monde fin 2020 (AIEA RDS 2- 41 et WNISR 2021)

Seuls les USA (14), l'Allemagne (5) et le Japon (1), ont achevés des démantèlements en raison de l'âge de leur parcs ou de décisions d'arrêt, comme en Allemagne. Sur les 59 réacteurs arrêtés de type REP, 7 sont démantelés aux USA et 9 chantiers sur 14 sont bien avancés en Allemagne. En France un seul REP est largement démantelé, à Chooz(300MWe), et deux sont seulement en phase de mise à

¹ Auxquels il faut ajouter les 51 GW en construction

² Les chiffres sont donnés à partir de publication AIEA diverses mais récentes : des écarts, minimes, peuvent apparaître selon les sources

l'arrêt définitif, à Fessenheim³. Il est difficile de prévoir le nombre de réacteurs REP (très majoritaires, 365 unités opérationnelles) qui seront arrêtés dans les prochaines années car, comme constaté aux USA, leur capacité à fonctionner bien au-delà des 40 ans est acquise⁴, beaucoup d'entre eux ayant obtenu une licence pour 60 ans, voire 80 ans. La pression sur le climat, suite à la COP 26 devrait aller dans le sens de prolongation des exploitations, y compris en France. C'est cependant une question industrielle majeure puisqu'une limite d'exploitation à 50 ou 60 ans généralisée conduirait à environ 100 ou 275 arrêts supplémentaires dans les 20 ans.

Si l'expérience française sur les démantèlements de centrales REP semble encore limitée, il ne faut pas négliger l'expérience acquise à l'étranger (par exemple par la filiale d'EDF Cyclelife), ni l'acquis du démantèlement des unités françaises les plus anciennes, sur lesquelles plusieurs décennies d'expériences ont été cumulées en faisant appel à des technologies largement robotisées et à des procédures très sécurisées.

Les réacteurs à eau légère sont techniquement plus faciles à démanteler pour au moins 3 raisons :

- leur architecture est relativement simple et standardisée, ce qui permet de bénéficier de l'effet de série. EDF et Framatome possèdent déjà une grande expérience du démantèlement des plus gros composants des REP avec le remplacement déjà réalisé de dizaines de générateurs de vapeur, pièces massives et contaminées de 300 tonnes et 20 mètres de hauteur, mais aussi de nombreux composants du circuit primaire. Ces opérations lourdes ont commencé il y a une trentaine d'années, en 1990, et elles se poursuivent aujourd'hui sur 2 réacteurs par an sur notre territoire, ainsi qu'à l'exportation,
- le démantèlement de Chooz A, premier REP français, est en voie d'achèvement : bien que de taille plus modeste (300 MWe) les opérations concernaient des pièces de taille significatives.
- la standardisation des unités françaises est telle que des procédures, elles-mêmes très standardisées, permettront de rentabiliser des moyens très automatisés,
- les compétences et le tissu industriel sont disponibles, y compris pour la gestion des déchets. Les centres de stockage de l'ANDRA existants et opérationnels (ou leurs extensions envisagées) sont aptes à recevoir la quasi-totalité des déchets de démantèlement, une fois les combustibles évacués.

2. Les stratégies de démantèlement dans le monde.

Plusieurs stratégies sont possibles :

- le **démantèlement immédiat**, le plus tôt possible après l'arrêt définitif afin d'éviter de reporter sur les générations futures le poids des opérations et de s'appuyer sur l'expérience des salariés ayant participé à l'exploitation des centrales concernées. En France, il est inscrit dans la loi, étant entendu que la longueur des procédures de l'annonce de l'arrêt à l'autorisation de démantèlement, sont longues, de 5 ans environ. La Belgique, l'Allemagne et l'Espagne ont également opté pour cette stratégie qui a été rendue possible, entre autres, par la maturité des technologies de télé-opérations et de robotique, favorisant les interventions dans des zones fortement irradiantes. L'AIEA recommande cette option,
- le **démantèlement différé** consiste à attendre que la radioactivité baisse naturellement avant de commencer la déconstruction. Il conduit à des opérations moins complexes et à une optimisation de la dosimétrie pour les intervenants. Le principal radioélément visé est le cobalt 60 qui, au bout de 53 ans est 1000 fois moins radioactif. Il permet aussi d'étaler les dépenses dans la durée. Le Royaume-Uni et l'Espagne ont retenu cette stratégie, comme de fait la France pour les anciens réacteurs de la filière UNGG (6) ainsi que pour l'ancien (et unique)

³ Par ailleurs en France le démantèlement de 9 réacteurs de première génération de 4 technologies différentes est en cours (6 graphite/gaz et 1 à Eau Lourde de première génération), ainsi que celui d'un RNR sodium. Plusieurs réacteurs de recherche sont déjà totalement démantelés.

⁴ Cette période de 40 ans correspondait à une période d'amortissement de l'investissement initial.

prototype de la filière à eau lourde de Brennilis. Aux USA, les deux stratégies sont possibles mais l'assainissement complet du site doit être achevé dans un délai maximal de 60 ans après l'arrêt,

- **le confinement sûr** (en anglais « entomb »). Il s'agit de couler du béton dans le bâtiment réacteur, les éléments les plus actifs se trouvant dans un sarcophage. Une réduction importante des coûts et de la durée de l'opération est obtenue, au prix de moindres garanties en termes de sûreté sur le très long terme. Les Etats-Unis l'utilisent pour des installations militaires situées au-dessous du niveau du sol. La Russie s'intéresse aussi au procédé.

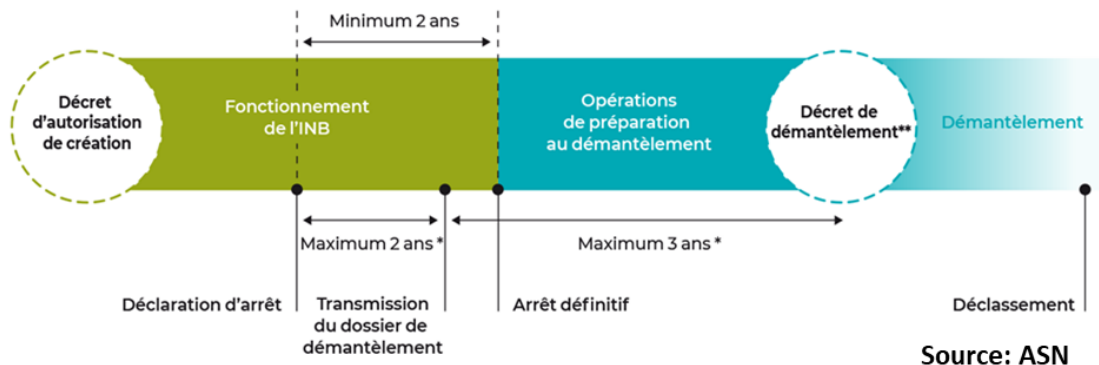
3. **Installations Nucléaires de Base (INB), un cadre réglementaire français très contraignant**

En France, le processus du démantèlement est fortement réglementé⁵. Le démantèlement est autorisé par un décret de mise à l'arrêt définitif et démantèlement, pris après avis de l'ASN et enquête publique auprès des populations locales. Ce décret est publié au maximum 5 ans après la déclaration d'arrêt de la centrale faite par l'exploitant. La sûreté de la centrale en phase de démantèlement fait l'objet d'un réexamen périodique et, à l'issue de son démantèlement, l'INB peut être déclassée (ASN).

La Cour des Comptes, dans son rapport de février 2020 sur l'arrêt et le démantèlement des installations nucléaires, relève la lourdeur des procédures administratives : « Une simplification des décrets de démantèlement serait souhaitable, au profit d'un pouvoir de décision accru de l'ASN pour leur mise en œuvre. Par ailleurs, les autorités administratives ne sont pas aujourd'hui organisées pour apprécier les arbitrages proposés par les exploitants entre les différents objectifs législatifs et réglementaires de coûts, de délais et de niveau d'assainissement ». On verra aussi plus loin le caractère très contraignant de la gestion des déchets en France.

4. **Les grandes étapes d'une opération de démantèlement**

La phase de démantèlement succède à la phase de fonctionnement de l'installation et se termine à l'issue du processus de déclassement de l'installation. Elle se décline en trois phases après la déclaration d'arrêt présentée par l'exploitant :



* Délai prorogeable de 2 ans dans certains cas.

** Le décret de démantèlement prend effet à la date à laquelle l'ASN approuve la révision des règles générales d'exploitation et au plus tard un an après la publication du décret.

Phase 1 : dans un délai de deux ans au maximum après la déclaration d'arrêt définitif de l'exploitation par l'opérateur, le réacteur étant toujours en fonctionnement, son opérateur transmet à l'ASN le « Dossier de démantèlement », qui couvre la totalité des opérations : modalités de démantèlement et de réhabilitation du site, état de l'INB lors de l'arrêt définitif, mémorisation des opérations, état du site en fin de démantèlement. Il est accompagné des très lourdes mises à jour des principaux dossiers réglementaires (rapport de sûreté, règles générales d'exploitation, plan

⁵ Loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire, Code de l'environnement et décret du 28 juin (modification, arrêt définitif et démantèlement des INB)

d'urgence interne, ...), adaptés à un effectif réduit et aux nouveaux corps de métiers nécessaires. L'ASN recommande que ce dossier soit déposé au moins trois ans avant la date envisagée pour le début des opérations de démantèlement, d'autres procédures pouvant encore alourdir ce délai (Enquêtes publiques et consultations locales, Euratom, ...).

Phase 2 : dite de préparation au démantèlement qui est limitée à la préparation du chantier (aménagement, formations, ...), à la caractérisation de l'INB (radiologique en particulier), aux modifications ou constructions requises pour commencer le démantèlement (soumises à autorisation de l'ASN) et, ce qui est essentiel, à l'évacuation des substances radioactives et dangereuses. Le combustible est déchargé, les circuits sont vidangés, des installations non nucléaires sont déconstruites. Ces opérations sont elles-mêmes éventuellement soumises à des autorisations de l'ASN. **A l'issue de cette étape, 99,9% de la radioactivité présente sur le site est éliminée.**

Phase 3 : dite de démantèlement est la plus technologique et couvre de nombreux domaines :

- Travaux visant à faciliter progressivement les opérations concernant les parties radioactives et/ou contaminées : construction d'ateliers dédiés, démontage des équipements hors bâtiment réacteur (tout en conservant ce qui concerne sécurité et sûreté), démontage des gros composants du circuit secondaire et du circuit primaire dans le bâtiment réacteur.
- Décontamination des composants avant mise aux déchets.
- Découpe sous eau de la cuve en télé opération avant envoi aux déchets.
- Assainissement du génie civil et déconstruction.

A l'issue de cette phase, le site retrouve son niveau de radioactivité naturelle et sa surveillance n'est plus nécessaire. On distingue 2 états possibles de l'état final :

- le « greenfield » ou « retour à l'herbe » : le terrain est libéré pour toute activité ultérieure après un assainissement complet,
- le « brownfield » : une réutilisation industrielle du terrain assortie de restrictions d'usages (servitudes) est possible après un assainissement poussé.

5. Patience : il faut 15 ans pour démanteler un REP

Le déroulé des obligations administratives et des autorisations décrites ci-dessus, mais aussi le retour d'expérience international montrent que la durée du démantèlement d'un REP est d'environ 10 ans à compter de l'obtention du décret de démantèlement, ou 15 ans après la décision d'arrêt par l'opérateur (la durée effective dépend bien entendu des moyens mis en œuvre, notamment en main d'œuvre, pour réaliser les opérations). Aux USA, 7 REP ont été totalement démantelés et déclassés en moins de 15 ans, réhabilitation des sols comprise, tous bâtiments et infrastructures éliminés.

Chooz A, premier REP français, d'une puissance de 305 MWe, a été mis à l'arrêt en 1991. Le démantèlement des internes de cuve et de la cuve du réacteur, dernière étape du démantèlement, devrait s'achever en 2022, 15 ans après l'obtention du décret de démantèlement.

Il est essentiel que la question des procédures appliquées soit traitée par le gouvernement et les élus. Il n'est pas normal qu'en France un enlisement réglementaire provoqué par des contentieux sans fin puisse bloquer des démantèlements sans difficultés exceptionnelles, comme c'est le cas par exemple pour celui du réacteur à eau lourde de Brennilis⁶, et la réalisation du centre de recyclage promis à Fessenheim par le gouvernement.

6. Les déchets issus du démantèlement

Près de 60% des déchets radioactifs produits d'ici 2050 en France seront des déchets de démantèlement, soit 700 000 m³, pour plus de 99% des déchets TFA (Très Faible Activité) et des déchets FMA-VC (Faible et Moyenne Activité à Vie Courte).

⁶ Ce réacteur de 70 MWe seulement, arrêté en 1985, ne sera pas complètement démantelé avant 2040, à un coût supérieur de plus de 50 % à celui d'un PWR de 900 MW !

En France, on distingue 2 grandes catégories de déchets:

- les déchets issus de Zones à Déchets Conventionnels (ZDC) qui sont non radioactifs et qui constituent la majeure partie des déchets (gravats et métaux),
- les déchets issus des Zones à production possible de Déchets Nucléaires (ZppDN) comportent des matériaux radioactivés et/ou contaminés, et des matériaux sans radioactivité décelable, mais issus de ces zones et largement majoritaires. Ils sont tous gérés comme s'ils étaient radioactifs, même lorsque les appareils de mesure ne détectent pas de radioactivité. Ils doivent être stockés dans un centre conçu pour les déchets nucléaires.

Ce principe de zonage est une spécificité française qui permet de garantir la traçabilité des déchets depuis leur production jusqu'au stockage, mais qui contribue à augmenter significativement le volume des déchets stockés, et qui est donc pénalisante pour les sites de stockage de l'Andra⁷. Cette pratique n'est pas cohérente avec le Code de l'environnement qui préconise, entre autres, la valorisation des déchets par le réemploi ou le recyclage avant d'envisager le stockage en dernier ressort. Tous les pays européens ayant une industrie nucléaire ont mis en place selon des modalités différentes d'application de « seuils de libération » définis par l'AIEA, en conformité avec la possibilité offerte par la directive 2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013. Ces seuils permettent la réutilisation ou le recyclage dans le domaine conventionnel de déchets issus du nucléaire. Ces matériaux peuvent donc être exportés par ces pays vers la France! A titre de comparaison le volume de déchets de démantèlement d'une centrale allemande serait environ moitié de celui d'une française avec des moyens de caractérisation qualifiés et des délais de démolition plus courts.

Un consensus existe désormais en France pour « examiner avec pragmatisme dans quelles conditions et avec quelles limites des adaptations du principe du zonage pourraient être apportées », sans toutefois aller jusqu'à un seuil de libération⁸. L'ASN, dans un avis du 30 juin 2020, acte de cette nécessité, mais en la limitant en premier lieu aux seuls déchets métalliques. On peut donc craindre le maintien en France de méthodes très restrictives, qui impacteront le coût des démantèlements, qui reposent sur une doctrine, et non sur l'appréciation des impacts sur l'environnement et la santé, insignifiants.

7. Une estimation du coût de démantèlement confortée par le retour d'expérience international

Les coûts du démantèlement ont fait l'objet de nombreuses études dont les résultats sont assez convergents pour les réacteurs de la génération actuelle. L'audit indépendant, réalisé en 2016 sous la commandite de la DGEC, a conforté l'estimation d'un coût total de 60,6 milliards € présenté par EDF pour le démantèlement du parc actuel (y compris celui de la gestion des déchets radioactifs associés à ces opérations), soit de 350 à 500 M€ par réacteur en fonction des effets de série (nombre de réacteurs de même type dans le parc) et de la mutualisation (plusieurs réacteurs sur un même site). C'est environ 10 % du coût d'investissement initial des réacteurs. Ce chiffrage est cohérent avec celui du Callan Institute qui évaluait en 2018 le coût du démantèlement des 108 réacteurs américains à 88,8 milliards \$. Pour un réacteur de 900 MWe fonctionnant pendant 40 ans, l'impact du coût du démantèlement sur le coût de production de l'électricité est compris entre 1,5 et 2 €/MWh (sur 42 €/MWh).

⁷ Le volume total des déchets français classés très faiblement radioactifs (TFA) pourrait être de 2 200 000 m³ en fin de démantèlement des installations opérationnelles (industrielle et de recherche). Ils sont stockés dans un centre de stockage en surface, le CIREs, situé dans l'Aube et exploité par l'Andra. D'une superficie de 45 ha, il est à ce jour destiné à accueillir 650 000 m³ de déchets. Son extension, à l'étude, devrait permettre de repousser l'horizon de sa saturation à la fin des années 2030.

⁸ La Commission Nationale d'évaluation (CNE 2017) l'IRSN (2016), l'Académie des Sciences et l'Académie des technologies (lors du débat public sur le PNGMDR 2019 – 2021), l'OPECST (2017), le CEGDD (2019), le HCTISN (2020), ont tous émis des avis allant vers un assouplissement de la réglementation française relative aux déchets TFA

Les provisions pour les charges futures de démantèlement sont réglementaires, incluses dans le prix de l'électricité, mises en place par EDF et couvertes par des « actifs dédiés » qui garantissent les dépenses futures. Sont-elles suffisantes ?

- Dans un rapport de l'Assemblée nationale de février 2017, la Mission d'information relative à la faisabilité technique et financière du démantèlement des installations nucléaires de base a constaté cependant que les provisions d'EDF sont parmi les plus basses de l'OCDE, sans filet de sécurité en cas d'écart sur les coûts,
- un audit de la « DGEC » a conclu que ces provisions étaient globalement d'un bon niveau,
- dans une audition par le Sénat en mars 2020, EDF a indiqué qu'à fin 2019 le taux de couverture de ces provisions était de 105,5%,
- dans son rapport du 4 mars 2020, la Cour des Comptes, tout en confirmant la qualité de la mise en œuvre du système français par les exploitants, a recommandé d'améliorer l'exhaustivité de l'analyse (incertitudes et des aléas dans l'évaluation de ces charges, évolution du taux d'actualisation utilisé pour le calcul de ces provisions).

Quelles que soient les incertitudes elles pèseront peu sur le bilan financier global du parc, et il est clair que l'extension de 10 ou 20 ans du fonctionnement des réacteurs actuels va dans le sens d'une consolidation des réserves mises en place par EDF.

8. Conclusion

Le démantèlement complet des réacteurs nucléaires existants à eau légère est non seulement réalisable techniquement, mais il bénéficie d'un retour d'expérience notable grâce aux opérations complètes déjà réalisées dans le monde sur une vingtaine de réacteurs, ou qui sont en cours en France (démantèlement complet incluant la gestion des déchets associés).

Les coûts associés à ces démantèlements sont bien appréciés et ne représentent qu'environ 10 % du coût de construction des réacteurs. Des provisions financières permettant de couvrir ces dépenses futures sont mises en place, conformément à la réglementation française.

Comme dans l'ensemble du domaine du nucléaire, des progrès sensibles conduiront à des réductions des coûts sans impacts sur la sûreté.

Une baisse des coûts devrait être recherchée grâce à un allègement des réglementations et des procédures, justifié par l'expérience acquise sur des installations standardisées, et en adoptant une gestion moins rigide des déchets TFA qui, pour l'essentiel, seront inactifs ou d'une radioactivité inférieure à la radioactivité naturelle.

Ces faits sont incontestables et contredisent certaines idées reçues, ou certaines affirmations totalement erronées, qui visent à faire croire à un public non averti que le démantèlement des réacteurs nucléaires est infaisable aujourd'hui ou qu'il coûtera des sommes astronomiques.