CHAPITRE 1

Le démantèlement des centrales nucléaires : contexte historique et questions scientifiques et techniques

Robert Dautray et Yves Bréchet

PLAN DU CHAPITRE

Abstract

Résumé

Introduction

- 1 Contraintes physiques spécifiques du démantèlement
- 2 Procédés mis en œuvre et colis de déchets
- 3 Cadre national et réalisations françaises
- 4 Cadre international : les trois options de l'IAEA
- 5 Méthodes de travail
 - 5.1. Échelles de temps
 - 5.2. Statut des aquifères
 - 5.3. Infrastructures de démantèlement
 - 5.4. Entreposages en cours d'assainissement – Démantèlement
 - 5.5. Caractéristiques volumiques, massiques, thermiques, radioactives (classées par nature des radiations, gamma, bêta, alpha, neutrons)
 - 5.6. Spécificité des situations accidentelles
- 6 Sciences et techniques du démantèlement
 - 6.1. Évaluation de l'état radiologique de chaque installation nucléaire : le terme source de radioactivité
 - 6.2. Éléments nouveaux du démantèlement comparés aux activités nucléaires pratiquées depuis les années quarante et cinquante
 - 6.3. Traduction réglementaire des effets biologiques sur le vivant
 - 6.4. Intervention en milieu hostile
 - 6.5. Procédés scientifiques et techniques de décontamination des structures et des sols [66]
 - 6.6. Traitement des déchets et effluents [41] du démantèlement
- 7 Les hommes
 - 7.1. Radioprotection
 - 7.2. Instrumentation de la dosimétrie
 - 7.3. Quels risques ?

Conclusion

Références

| Abstract

Decommissioning and dismantling the power plant nuclear reactors: A French program in a global context

The end of operation (or so-called, end of life) of the electric plant nuclear reactors: how to deal with obstacles due to radioactivity of some of their materials, possibly leading to different health hazards for the workers, the public and the environment, as well to residual thermal power?

Nine reactors of the nuclear power producer in France have already reached the end of their life. Dismantling operations are currently engaged, aiming at clearing the sites for any kind of use, from agriculture to housing. Out of the 58 nuclear power reactors in operation in France, 48 should end their operations before 2050.

All the industrialized nations exploiting nuclear energy share this common situation. Dismantling of nuclear power plant presents several distinctive features from regular demolition operations.

First they contain radioactive materials, implying potential hazards resulting from radiations, ingestion or inhalation. A list of these radioactive elements is provided in chapter 7, and specifically box 5.

Secondly, these radioactive elements release thermal power. If any incident were to prevent this energy to be released, materials close to the heat source could melt, leading to evaporation or chemical reactions, just like in Three Mile Island or Fukushima Daiichi 1.

Third, these phenomena represent a hindrance for the operators and prevent the use of classical demolition methods. For example, water cooling with no precautions could lead to the dispersion or dissolution of radioactive materials in water. But where to store this water, how to clean it, how to deal with filtrates?...

Therefore, we need to identify what mechanical, chemical, physical processes, what materials, using what energy, will allow us to avoid these hurdles to demolition of nuclear installations. We will have to conceive, implement and operate new equipment, yet to be imagined.

These imperatives to accompany the end of life of nuclear power plants will apply to many sites and units, particularly in the European Union. We will need to solve similar physical, chemical, geological, radiological, robotic, computer software issues with other nations that have scientific relations with France nuclear activities. We should look for potential series

effects, for example by properly normalizing waste packages, their sizes and sealing processes, for tens of thousands of units: we cannot afford to build as many conditioning units as there are countries in EU, or nuclear power sites.

Ultimately, the main criterion for choosing between different processes will be to minimize the radiation impact, direct or indirect, on workers, the public and the environment. This stresses the central role of radiation protection.

Finally, the goal of this paper is to identify, among so many new issues, the key scientific phenomena (in physics, chemistry, mechanics, computer science, automation, robotics, radiobiology) that would allow us to return nuclear power plants sites to the free and safe use, unconditionally.

Résumé

Le document porte sur la fin de vie des réacteurs de puissance des centrales de production électrique existant actuellement : comment traiter les difficultés dues à la radioactivité, tant par l'action du rayonnement sur les hommes que par sa puissance thermique résiduelle.

Neuf des réacteurs nucléaires du producteur d'électricité français sont déjà arrivés en fin de vie. Ils sont en cours de démolition afin de rendre leurs sites libres pour tous les usages, de l'agriculture à l'habitat. Parmi les 58 réacteurs nucléaires en cours d'exploitation, 48 devraient arriver en fin d'exploitation avant 2050. Cette situation est commune à toutes les nations industrialisées exploitant l'énergie nucléaire. Ces réacteurs sont dits en démantèlement (« *dismantling* » ou « *decommissioned* »). Retenons que, dans la seule Union européenne, il y en a 75. Aux États-Unis, il y en a 29.

Ces chantiers ont plusieurs caractéristiques les distinguant des autres chantiers de démolition.

Ils contiennent des matières radioactives, dont le rayonnement, l'ingestion ou l'inhalation peuvent constituer des dangers. La liste de ces matériaux, avec leur demi-vie, qui est inverse de l'intensité de ces sources, est donnée dans l'encadré 5 de la section 6.

Ces corps radioactifs dégagent une puissance thermique. Si un incident empêchait que cette énergie soit évacuée, les conséquences en seraient

une fusion des matériaux proches de ces sources de chaleur, pouvant conduire à des évaporations et à des réactions chimiques, comme à Three Mile Island et à Fukushima Daiichi 1.

Les phénomènes associés à la radioactivité sont des obstacles au travail des hommes et à la mise en œuvre des procédés classiques de démolition. Par exemple, refroidir avec de l'eau sans précaution pourrait entraîner une dispersion ou/et une dissolution des corps radioactifs dans l'eau. Mais alors où l'entreposer ? Peut-on la filtrer ? Mais alors que faire de la radioactivité des filtrats ?

Un autre exemple de complexité des procédures résultant des réactions nucléaires est le démontage des structures dont les matériaux constitutifs sont rendus radioactifs par des captures de neutrons. Comment les manipuler, les découper, les trier ? Qu'en faire ? Entreposage, récupération, stockage ?

En somme, quels procédés mécaniques, chimiques, physiques, quels instruments fabriqués avec quels matériaux, utilisant quelles énergies, vont contourner les obstacles à la démolition des installations ? Quels équipements faudra-t-il concevoir et construire, et avec quelles infrastructures va-t-on les mettre en œuvre ?

Ces impératifs d'accompagnement de la fin de vie des installations nucléaires se posent pour des dizaines de sites, en particulier en Europe. Va-t-il y avoir des effets de séries, par exemple en normalisant convenablement les caractéristiques des colis, des conteneurs, et donc l'encapsulation de cette dizaine de milliers de colis ? Il n'est pas pensable de construire autant d'usines de conteneurs et d'usines d'encapsulation qu'il y a de pays dans l'Union européenne. Les méthodes de normalisation des cahiers des charges et des méthodes de fabrication, et donc de contrôle de fabrication, sont présentées.

Le critère final de choix entre les procédés de mise en œuvre sera de minimiser les effets, directs ou indirects, des radiations sur les travailleurs et le public. C'est dire le rôle central de la radioprotection. On présente les éléments pour optimiser les préjudices subis par les hommes.

Finalement, cette contribution ambitionne de déterminer, parmi tant de problèmes souvent neufs, les connaissances scientifiques clés, qui permettraient le retour au libre usage des sites de toutes les catégories d'installations nucléaires à vocation de production d'énergie électrique.

Introduction

Comment va-t-on démanteler les 58 réacteurs de puissance à eau sous pression du parc nucléaire français quand ces réacteurs seront parvenus en fin de vie active de production d'électricité ? Comment réaliser ces opérations en assurant la sécurité des personnels, du public, de l'environnement ? Comment définir quantitativement ces opérations par un processus opératoire et répétable, dont on puisse garantir la fiabilité ?

L'objet de ce chapitre est de dresser un panorama des besoins et des conditions au démantèlement, afin de recenser les phénomènes scientifiques clés et d'identifier les recherches à mener dans le but de permettre un retour au libre usage des sites électronucléaires. L'analyse sera faite en termes de contraintes physiques et de procédés spécifiques au démantèlement (sections 1 et 2), en termes de bilan de l'existant en France (section 3), en termes de perspectives au niveau international (section 4), et enfin en termes de méthodes et de questions scientifiques (sections 5 et 6). La protection des hommes contre les radiations, qui est la cause première des précautions prises lors du démantèlement, et même de la raison d'être de cette activité, sera abordée dans la section 7.

1 | Contraintes physiques spécifiques du démantèlement

Les chantiers de démantèlement des réacteurs de puissance électronucléaires des producteurs d'électricité des nations industrielles ont plusieurs particularités les distinguant des autres chantiers de démolition dans d'autres secteurs que le nucléaire.

Ils contiennent des matières qui sont devenues artificiellement **radioactives**¹, dont l'irradiation, l'ingestion ou l'inhalation peuvent constituer des

¹ Donnons un ordre de grandeur de la radioactivité entreposée dans les sites des centrales du parc nucléaire de puissance durant les opérations de production nominale d'énergie électrique :

- une enveloppe de cette radioactivité est de l'ordre de grandeur des combustibles UOX et MOX usés en attente de refroidissement avant d'être expédiés à l'usine de retraitement de La Hague. Cette radioactivité est de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de pétabecquerels, selon le nombre de réacteurs sur chaque site et leur âge, d'après l'inventaire Andra [68], page 279. À titre de comparaison, la radioactivité entreposée à La Hague sous forme de colis de déchets vitrifiés (dits CSD-V), est, selon la même référence, d'environ 173 EBq. Elle décroît d'un facteur 10 en environ 60 ans ;
- une fois les éléments combustibles irradiés enlevés et évacués du site du réacteur, la radioactivité présente sur un chantier de démantèlement est de l'ordre du millième de celle

dangers à partir de seuils à étudier et définir (voir dans [2] le document 6 page 206, le document 66 page 252 et les documents 85-86, page 269). La liste de ces substances radioactives, avec leur demi-vie², qui est proportionnelle à l'inverse de l'intensité de ces sources radioactives, est donnée plus bas.

Un autre de leurs inconvénients est que les rayonnements émis par ces corps radioactifs, qu'ils soient β et γ ou α , sont freinés dans les matériaux qu'ils rencontrent, dégageant une **puissance thermique** dans ceux-ci. Si un incident empêchait que cette énergie thermique soit évacuée, les conséquences en seraient des changements de phase, allant jusqu'à la possibilité de fusion des matériaux proches de ces sources de chaleur, pouvant conduire à des évaporations et à des réactions chimiques, et donc à des **explosions chimiques** comme lors des accidents de la centrale de Three Mile Island et de celle de Fukushima Daiichi 1 (voir [105, 134]).

Un troisième inconvénient, lié à la nature nucléaire des déchets, est que ces phénomènes thermodynamiques et thermochimiques conduisant au réchauffement entraînent des obstacles au travail des hommes et à la mise en œuvre des procédés classiques de démolition. Par exemple, **refroidir avec de l'eau**, sans précaution, pourrait provoquer l'entraînement de ces substances radioactives dans l'eau, et la dispersion ou/et la dissolution des corps radioactifs. Où entreposer ces eaux contaminées par des substances radioactives ? Peut-on les filtrer ? Mais que faire alors des éventuels résidus radioactifs des filtrats ?

Un autre exemple de fonction dégradée par les réactions nucléaires est celui des **matériaux de structure** (voir [37, 39, 40, 45, 59]) rendus radioactifs par des captures de neutrons. Comment les manipuler, les découper, les trier ? Qu'en faire : entreposage, récupération, stockage ?

2 | Procédés mis en œuvre et colis de déchets

Quels procédés mécaniques, chimiques, physiques, quels outillages fabriqués avec quels matériaux, utilisant quelles énergies, vont permettre de contourner ces obstacles à la démolition des installations nucléaires ? Quels équipements faudra-t-il concevoir et construire, avec quelles infrastructures va-t-on les mettre en œuvre ?

des éléments combustibles jusqu'alors entreposés en piscine (voir les documents 5-6 de la page 206, 87 de la page 269 de [2] et l'inventaire Andra [68]).

² L'évaluation de ces demi-vies, en fonction des caractéristiques des noyaux radioactifs, est effectuée, par exemple dans le chapitre 11 de la référence [106].

Ces impératifs d'accompagnement de la fin de vie des installations nucléaires se posent pour 19 sites de centrales en France et pour une cinquantaine en Europe. Quelle sera l'ampleur des simplifications dues aux effets de séries, en France, sur les procédés de démantèlement ? Le démantèlement conduit à réaliser des colis identiques à ceux du cycle du combustible et des déchets d'exploitation des centrales électronucléaires. Pourra-t-on utiliser seulement les mêmes colis standards du cycle de combustible et de l'exploitation nominale des centrales ? En faudra-t-il d'autres présentant des caractéristiques différentes ? La définition de colis spécifiques pourrait s'avérer nécessaire dans le cas de déchets de graphite irradié.

Il y a donc interaction entre l'activité de démantèlement, le champ d'action de l'exploitation des centrales électronucléaires et le domaine d'activité du cycle aval du combustible par le biais de la fabrication et de la mise en œuvre des colis de déchets radioactifs, de leur transport, de leur entreposage et de leur stockage définitif (voir [129]). Par exemple, il faudra normaliser convenablement les caractéristiques des colis, des conteneurs, et donc l'encapsulation de cette dizaine de milliers³ de colis. Il n'est pas pensable de construire autant d'usines de conteneurs et d'usines d'encapsulation qu'il y a de centrales en France ou bien de pays dans l'Union européenne. Les méthodes de normalisation des cahiers des charges et des méthodes de fabrication, et donc de contrôle de fabrication, sont également étudiées.

Le critère final de choix entre les divers procédés de démantèlement de tel ou tel réacteur de centrale électronucléaire de France sera de minimiser les effets des radiations, directs ou indirects, sur les travailleurs, le public et l'environnement. C'est dire le rôle central de la **radioprotection**. L'ensemble de ce séminaire ambitionne de déterminer, parmi tant de problèmes de physique, de chimie (voir [77, 78 et 126] pour la radiochimie), de mécanique et de biologie, les questions scientifiques qui, une fois éclaircies, permettraient le **retour au libre usage des sites** de toutes les catégories d'installations nucléaires à vocation de production d'énergie électrique.

3 | Cadre national et réalisations françaises

Neuf parmi les réacteurs « de puissance » de six centrales⁴ du producteur d'électricité français sont déjà arrivés en fin de vie de production d'énergie électrique nominale. Ils sont en cours de démolition afin de rendre les sites

³ Ce nombre est relatif aux déchets vitrifiés dit CSD-V, cité dans la page 279 de [68].

⁴ Bugey-1, Chinon-A1 à A3, St-Laurent-A1 et A2, Chooz-A, Brennilis et Superphénix. Ce nombre est porté à douze réacteurs sur sept sites si l'on ajoute Phénix, G2 et G3 à Marcoule, réacteurs qui étaient exploités non par EDF mais par la Cogema (ancêtre d'Areva) et le CEA.

libres à tous les usages, de l'agriculture à l'habitat, de l'industrie aux services, avec des **critères libérateurs**. Parmi les 58 réacteurs nucléaires actuellement en cours d'exploitation en France, 48, dans le cadre réglementaire actuel, arriveraient en fin d'exploitation entre aujourd'hui et 2050. La liste des 19 sites des centrales électronucléaires et des 58 réacteurs de puissance est donnée en annexe de ce chapitre.

Cette situation est commune à toutes les nations industrialisées exploitant l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité. Ces réacteurs sont dits en « déclassement » (*decommissioning*), pour l'arrêt officiel d'exploitation de la source d'électricité et l'autorisation de démolition des installations en respectant les règles de sécurité, ou/et en « démantèlement » (*dismantling*) pour l'aspect démolition proprement dit. Leur liste est également donnée en annexe. Retenons que, dans la seule Union européenne, il y a une centaine de réacteurs de puissance en arrêt pour démolition. Aux États-Unis, il y en a 28 en cours de démantèlement et 11 ayant terminé leur phase de démantèlement et rendus à l'usage dit « libre d'emploi ».

Les 58 réacteurs à eau pressurisée (REP) de la France forment un ensemble d'une spécificité unique au monde pour ce qui est du démantèlement. Ils sont tous quasi identiques, à un facteur d'échelle de puissance près, ce qui leur permet de bénéficier d'un avantage de série, tant pour la réalisation de leur démantèlement que pour la recherche scientifique ayant pour but d'ouvrir les verrous physicochimiques éventuellement rencontrés pour cette fin de vie opérationnelle. L'ordonnancement de ces opérations de démantèlement dépend de la durée de vie autorisée pour chacun des réacteurs de puissance. Ces décisions d'éventuelle prolongation de durée de vie sont donc stratégiques.

En France, les réacteurs des centrales arrêtés et en cours de démantèlement sont les suivants :

- centrale de Chooz : un REP arrêté et en cours de démantèlement ;
- centrale de Brennilis : un réacteur à eau lourde arrêté et en cours de démantèlement ;
- centrale de Saint-Laurent-des-Eaux : deux réacteurs UNGG (uranium naturel graphite gaz) arrêtés et en cours de démantèlement ;
- centrale de Chinon : trois réacteurs UNGG arrêtés et en cours de démantèlement ;
- centrale de Bugey : un réacteur UNGG arrêté et en cours de démantèlement ;
- centrale de Creys-Malville : un réacteur sodium rapide Superphénix arrêté et en cours de démantèlement ;

- centre de Marcoule : un réacteur sodium rapide Phénix arrêté et en cours de démantèlement et les deux UNGG G2 et G3⁵.

Encadré 1 – Les spécificités des centrales électronucléaires (EN) de la France

1. La construction de ces réacteurs a été groupée sur une courte période. Il en résulte que leurs démantèlements seront également groupés. Les caractéristiques de ces réacteurs se répartissent en deux familles homogènes, les 900 MWe et les 1 300 MWe. Les procédés, les équipements, les infrastructures, les recherches et développements seront donc les mêmes. On bénéficiera donc d'un **effet de série**.
2. Tous ces réacteurs ont le même **cycle de combustibles**, avec un retraitement des combustibles usés à l'usine de La Hague : extraction du plutonium (voir [28, 41]), d'une part, des produits de fission⁶ et des actinides transplutoniens (américium et curium) en deuxième part, de l'uranium, en troisième part. Les éléments usés refroidissent d'abord sur le site du réacteur jusqu'à atteindre une température permettant leur expédition, correspondant à une puissance de 500 watts par élément combustible usé (en durée de refroidissement, cela nécessite de connaître l'enrichissement et le taux de combustion ; par exemple, voir dans la référence [2], page 221, le document 25 qui conduit à une durée de 25 à 30 années de refroidissement). Les éléments usés sont alors transférés à La Hague pour poursuivre leur refroidissement dans une piscine, libérant ainsi le site des centrales de la source principale de radioactivité. Le destin des effluents, des déchets⁷ solides, des rejets gazeux, liquides, solides, etc., du plutonium, de Am, du Cm, etc. est donc déconnecté du site en démantèlement. Pour le cas des MOX, voir une présentation dans [28] et [138].
3. Les différentes constantes de temps des opérations de démantèlement, qui sont liées tant au design du réacteur qu'aux demi-vies des substances radioactives du réacteur et du site vidés des éléments combustibles usés, sont analogues, induisant un effet de série sur les échelles de temps des diverses centrales EN. Cela conduit donc à traiter simultanément l'ordonnancement, non pas d'un chantier de démantèlement, mais de tous les chantiers.

⁵ Le réacteur G2 a été relié au réseau EDF de 1956 à 1980, produisant 5 284 GWh et le réacteur G3 de 1960 à 1984, produisant 6 262 GWh.

⁶ Les phénomènes particuliers du ruthénium sont traités dans [67].

⁷ Les listes exhaustives, tenues à jour, des déchets radioactifs de toute nature, sont publiées périodiquement par l'Andra, accessibles sur Internet à www.andra.fr (voir [126-129]).

4. Ceci permet le partage des outils, des grands équipements sur les chantiers et des grandes infrastructures (appareils de levage, de manipulation, de transport, robotique, calcul scientifique, etc.).
5. Il faut donc harmoniser les activités de démantèlement avec celles du cycle de combustible (voir [107]), celles de l'enfouissement des déchets, celles de la Défense nationale, celles des hôpitaux (radiothérapie), etc. Pour s'y préparer, il faut identifier les interfaces des activités de démantèlement avec les autres programmes, tant en nature, calendrier, contraintes, espaces, qu'en ressources humaines (radioprotection).
6. Dans ce contexte compliqué, il faut déterminer les activités de démantèlement qui doivent être menées sur le site de la centrale et celles qui doivent être effectuées sur une ou des unités communes. Tôt ou tard, tous les déchets radioactifs présents sur chaque site de centrale, devront être extraits et envoyés dans des unités de traitement des déchets radioactifs (usines de fabrication des colis radioactifs standards, usines d'encapsulation).
7. La similitude des REP, donc des déchets de chaque réacteur, permet de simplifier les usines d'encapsulation et de réduire le nombre de catégories des conteneurs standards.

Les différentes options pour mener le chantier d'un site de démantèlement, options rencontrées au fil des décennies, sont les mêmes sur tous les chantiers, ce qui permet à chacun d'eux de profiter de l'expérience des précédents. Les critères de comparaison des options : réduction des risques, sécurité, sûreté passive, maîtrise des délais, respect de l'environnement, coût (voir [135]), etc., peuvent être bien expérimentés. Les méthodes d'évaluation et de comparaison des options sont établies sur des bases répertoriées.

93 % des déchets radioactifs du démantèlement d'une centrale EN sont des déchets MA-VL (moyenne activité, vie longue). En volume, 0,01 % des déchets du chantier de démantèlement sont des HA (haute activité). En France, pour 9 réacteurs électronucléaires en cours de déconstruction, l'exploitant comptait en 2012 les masses⁸ suivantes de déchets radioactifs (voir [91]) : TFA 115 000 tonnes, FA-MA VC 53 000 tonnes, FA-MA VL 300 tonnes, Graphite (voir [50]) 17 100 tonnes, soit en tout 185 400 tonnes de déchets radioactifs. Les déchets non radioactifs, dits conventionnels, étaient évalués à 800 000 tonnes. La proportion des déchets MA VL est donc de 0,2 %, en masse. Il n'est pas fait mention de déchets de haute activité.

⁸ Dans les notes dont nous disposons, l'exploitant publie en *masse* de déchets et l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) en *volume*, en catégories de

Encadré 2 – Les déchets radioactifs produits par le démantèlement des 12 réacteurs des centrales électronucléaires arrêtés en France

(Voir [98-101] et le cadre général dans [2].)

Le démantèlement des neuf réacteurs d'EDF produira environ **800 000 tonnes de déchets non radioactifs** (dits classiques).

Les déchets de tout le parc électronucléaire sont évalués pour 2030 à environ 1 800 000 tonnes.

Les **185 400 tonnes de déchets radioactifs** issus des 12 réacteurs arrêtés se décomposent en :

- FA-VL et MA-VL : 300 tonnes ;
- Graphite irradié : 17 100 tonnes ;
- FMA-VC : 53 000 tonnes ;
- TFA : 115 000 tonnes.

La part des radioactivités les plus élevées, une fois les combustibles usés évacués du site de la centrale électronucléaire arrêtée, est due aux éléments dits « de contrôle de la neutronique du réacteur », qui comportent des noyaux atomiques absorbant les neutrons (voir éléments absorbants de contrôle [107]), et aux structures internes.

Rendre ces sites libres d'emploi en définissant ce terme avec rigueur par des normes mesurables, reproductibles et vérifiables, telles que celles définies par les instances internationales de radioprotection [117-125], est un objectif majeur de ces opérations de démantèlement des centrales EN.

À titre de comparaison au niveau international, des exemples de réalisations de démantèlements terminées, avec le site rendu libre d'emploi, sont

radioactivité (HA : haute activité, MA : moyenne activité, FA : faible activité, TFA : très faible activité, VC : vie courte, VL vie longue, etc.) des colis et en familles des colis. Pour les inventaires en unité de radioactivité (becquerel ou curie), l'Andra publie, pour chaque famille de colis, la radioactivité du total des colis de la famille, avec de plus, la part α , la part β et la part γ avec les prévisions de cumul en 2020 et 2030. Pour la variation de la radioactivité des radionucléides au cours du temps, nous renvoyons aux documents 5, 6, 10, 11, 15 de [2] et, pour les puissances thermiques résiduelles, aux documents 23, 24, 25, 26, 44, 45 de [2]. Les variations de ces matières radioactives en fonction du temps sont considérables (voir les documents 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63 de [2]). C'est pour cette raison que ces quantités de radioactivité ne peuvent pas servir de base à un document d'inventaire fixe.

deux au Royaume-Uni : Berkeley (AGR⁹) et Windscale (Magnox), deux aux États-Unis : Connecticut Yankee et Maine Yankee¹⁰, un en Espagne : Vandellòs, deux réacteurs en Allemagne sur le site de Greifswald, et un au Canada : Ontario¹¹.

Ces chantiers ont été confrontés, en termes d'objectifs, de déroulement, de problèmes physicochimiques et de calendriers, à des obstacles qu'ils ont franchis.

4 | Cadre international : les trois options de l'IAEA

Le décompte des réacteurs arrêtés dans le monde à la date du 31 décembre 2012 est de 144 réacteurs de puissance (voir Annexe). Leurs exploitants n'ont pas encore tous choisi s'ils veulent commencer rapidement leur démolition ou bien s'ils veulent attendre de nombreuses années afin que la radioactivité ait largement décru avant d'entamer les travaux de démantèlement. De plus, des exploitants peuvent se révéler dans l'impossibilité d'entreprendre les travaux de démantèlement, tant à court terme qu'à long terme.

Plus généralement, une cession de responsabilité peut être effectuée au profit d'un organisme public. C'est le cas au Royaume-Uni (voir [26]).

Les contraintes dues à la radioactivité des matériaux de la centrale exigent un équipement très spécialisé, lequel n'est pas toujours disponible, ni opérationnel au moment où le chantier le nécessite. Attendre la diminution de la radioactivité est alors une option possible. Cette durée permet, par exemple, de diminuer la radioactivité des isotopes tels que le cobalt 60, car leur demi-vie est inférieure à une trentaine d'années, ce qui est compatible avec les entreprises humaines (voir le document 85, page 269 de [2]). Ces considérations ont conduit l'IAEA (voir la référence [118]) à sélectionner trois options de décommissionnement/déconstruction (DD), qui sont :

- **la démolition immédiate** (*Immediate Dismantling*) : pour **15 réacteurs** arrêtés, dans le monde entier, cette option a été choisie et le démantèlement du réacteur concerné est terminé. **51 réacteurs** sont encore en cours de démantèlement dans le cadre de cette option ;

⁹ AGR : *Advanced Graphite Reactor*.

¹⁰ Le plan du réacteur de cette centrale électronucléaire est proche de ceux des REP 900 MWe de EDF.

¹¹ CANDU : CANada Deutérium Uranium.

- **la clôture** : la fin de l'exploitation de la centrale électronucléaire est suivie d'un arrêt de toute activité sur le site, hors de celle de maintien de la sûreté nucléaire. Elle est dénommée *Safe Enclosure* (abrégée en Safestor) : **48 réacteurs** dans le monde sont dans cette situation ;
- **une mise en cocon** provisoire (*Entombment*) doit permettre d'attendre sans risque une décision définitive. **Trois réacteurs** sont dans cette situation dans le monde.

Il faut ajouter à ces trois catégories les installations nucléaires arrêtées dont l'option de démantèlement n'est pas encore choisie. La liste des exemples de classements en France, en Allemagne, au Royaume-Uni, aux États-Unis, pour des réacteurs nucléaires de puissance en cours de démantèlement, analogues à ceux que nous aurons à démanteler en France, est donnée en annexe de ce chapitre.

À ce cadre international s'ajoutent ou se substituent des cadres nationaux, par exemple la *Nuclear Decommissioning Agency* (NDA, Royaume-Uni), la *Nuclear Regulation Commission* (NRC, États-Unis)¹². En France, le rôle des agences d'État est actuellement partagé entre plusieurs organismes : Autorité de sûreté nucléaire (ASN) pour la sûreté nucléaire (voir [1]), EDF pour la conduite des travaux de démolition sur les sites de ses installations, DGEC (Direction générale de l'énergie et du climat) pour la préparation administrative des décisions du gouvernement, CEA et Andra pour les recherches scientifiques et techniques.

5 | Méthodes de travail

5.1. Échelles de temps

Les ordres de grandeur des durées des diverses tâches concourant à **l'ordonnement des travaux** sur un site de démantèlement d'un réacteur de centrale nucléaire de production sont :

- quelques années pour faire l'avant-projet, puis le projet de démantèlement. Dans ce processus, l'évaluation des risques et leur gestion sont une démarche amont essentielle ;
- préparation et construction des équipements nécessaires au programme de démantèlement : 5 ans ;

¹² Voir en particulier la section 3, *Selection of a decommissioning option*, page 7.

- modification de l'architecture de l'installation pour effectuer les opérations : 5 ans ;
- installation des équipements et essais : 3 ans ;
- installation des entreposages d'interim : 8 ans ;
- organisation des campagnes annuelles hors d'eau (une vingtaine) : 20 ans.

Parallèlement, il faut identifier celles des actions sur les déchets du démantèlement qui doivent être effectuées hors du site, dans des installations dédiées à ces tâches plus ou moins lointaines. Il faut également disposer de places d'entreposage pour diminuer les encombrements sur le site.

Les recouvrements d'opérations doivent être étudiés : dans quelles mesures peut-on accepter de commencer le démantèlement en ayant encore des combustibles sur le site ?

Il faut également accepter d'entreposer des grands composants difficiles à découper, afin de faire décroître tel ou tel radionucléide à vie relativement brève vis-à-vis des échelles de temps des opérations de démantèlement (par exemple, le cobalt 60).

5.2. Statut des aquifères

Les objectifs de l'assainissement des sols, cités dans la section 6.4, peuvent devoir comporter celui de la nappe phréatique, des aquifères (voir [49]) liés au site, des compositions organiques liées à la végétation locale (composition, surface, volume, radioactivité, chimie, circulation...). C'est dire la nécessité d'un **cahier des charges de l'assainissement**.

Le paragraphe précédent nous a rappelé un aspect de l'importance des eaux de toutes provenances et de toutes fonctions, dans un chantier de démantèlement. Ajoutons-y la nécessité de l'usage de l'eau comme fluide de refroidissement [32] des matériaux radioactifs de l'installation en démantèlement. L'eau est aussi présente sur le chantier de démantèlement par les précipitations, les rosées, les ruissellements, la neige, les orages, l'humidité de l'air, et éventuellement les inondations. De plus, l'eau qui baignerait des corps radioactifs subit une radiolyse qui rendrait le fluide résultant actif sur le plan chimique. Les éventuelles hautes températures peuvent la décomposer et libérer de l'hydrogène¹³.

¹³ L'explosion chimique survenue à la centrale de Fukushima a été causée par l'inflammation de l'hydrogène présent dans l'enceinte, suite à la décomposition de l'eau du circuit

Il faut donc prévoir sur le site de démantèlement la possibilité de filtration, d'épuration, d'entreposage des eaux usées et des résines de filtration. Plus généralement, il faut mettre au point des procédés de traitement des eaux suivant le cahier des charges implicite cité ci-dessus. Il faut placer hors d'eau¹⁴ toutes les installations radioactives du site à mesure que le chantier évolue, traiter les résines, la floculation, les effluents liquides et les boues radioactives.

5.3. Infrastructures de démantèlement

Une tâche préalable aux travaux sur les **chantiers des sites** est de déterminer et de réaliser les **infrastructures** [32], les équipements, les outillages, les entreposages, les grues, les piscines, les rangements, les robots, les instrumentations, etc. Cela doit être effectué : (i) pour chaque site ; (ii) pour des groupes de sites (par exemple, tous les sites des UNGG) et (iii) pour l'ensemble des 58 réacteurs répartis sur les 19 sites des centrales nucléaires (par exemple, pour les entreposages, les laboratoires chauds, la réalisation de robots, etc.).

Pour ce faire, certains des équipements existants sont à conserver et éventuellement à adapter (procédés chimiques, physicochimiques). De nombreux équipements sont concernés : couvercle, échangeur de chaleur, « pressuriseur », pompes primaires, etc. Les colis, eux, sont en très grand nombre (des milliers à des centaines de milliers). Ajoutons que le colis « couvercle » de la cuve d'un REP pèse de 120 tonnes à 174 tonnes¹⁵. C'est dire l'importance des **équipements de manutention des colis**.

Pour harmoniser les transports entre tous ces grands équipements, pour les 58 réacteurs REP qui seront à démanteler dans les décennies à venir, **un cahier des charges global des transports et des exploitations de ces équipements** est donc nécessaire.

primaire, portée à très haute température par le gainage en zirconium, devant évacuer la puissance résiduelle du réacteur arrêté, donc où il ne restait plus de réaction en chaîne de fission [34].

¹⁴ « Placer hors d'eau » est l'expression courante sur tous les chantiers, pour les protéger de la pluie, de la neige, des écoulements au sol, des remontées de la nappe phréatiques, etc., et pour protéger les équipements qui sont livrés sur le site.

¹⁵ Notons toutefois que sa puissance résiduelle est négligeable et sa radioactivité d'environ 4 curies.

Tout cela est évidemment à placer dans la stratégie générale de tous les travaux de démantèlement des centrales et aussi des autres installations de l'électronucléaire (*i.e.* usines de retraitement) ^{16 17 18}.

5.4. Entreposages en cours d'assainissement – Démantèlement

Les entreposages permettent la compatibilité dans le temps des diverses opérations, tant pour le démantèlement d'un site que pour des ensembles de sites. Il est donc nécessaire de rassembler l'ensemble de tous les **ordonnements en un calendrier global**¹⁹ des travaux.

Ordonner les travaux des démantèlements en cours au fil des années exige de bien connaître leurs frontières et les conditions à ces limites durant la totalité de la durée de cette tâche. Par exemple, les **matériaux de structures des combustibles usés, déchargés du réacteur** en début de démantèlement, doivent-ils être comptés dans le démantèlement ou dans le stockage définitif des déchets radioactifs des activités liées à la radioactivité en France ? Le plus grand volume de ces déchets sera sans doute de **faible activité**. Ont-ils vocation à rejoindre les stockages définitifs de l'Aube ?

Pour les huit réacteurs UNGG, la radioactivité des déchets de tous les démantèlements des structures est estimée par l'Andra (page 252 de [68]) à 10^5 curies, dont environ le quart (en radioactivité) à vie longue et faible radioactivité. Le volume de tous ces déchets, FA, MA, HA, serait de 5 400 m³.

¹⁶ Le texte officiel de l'IAEA, en langue anglaise, est : 'Decommissioning strategies: 1: Immediate dismantling and removal of all radioactive material; 2: Deferred dismantling, placing all radiological areas into safe enclosure; 3: Deferred dismantling, including partial dismantling and placing remaining radiological areas into safe enclosure; 4: In situ disposal, involving encapsulation of radioactive materials and subsequent restriction of access;' etc. (voir [17-20]).

¹⁷ Les phases successives d'un démantèlement figurent dans le texte officiel de l'IAEA, en langue anglaise : 'Drawing up the final decommissioning plan. Reactor core defueling. Waste conditioning on site (only for decommissioning waste). Waste shipment off site (only for decommissioning waste). Safe enclosure separation. Partial dismantling. Active safe enclosure period. Passive safe enclosure period. Final dismantling. Final survey. End of the decommissioning process'.

¹⁸ Les exemples, au Royaume-Uni, en langue anglaise, sont 'used fuel management': 1. Transfer to a reactor facility. 2. Transfer away from reactor facility. 3. Storage in an on-site facility. 4. Storage in an off-site facility. 5. Shipment to a reprocessing plant. 6. Underwater storage. 7. Dry storage. 8. Encapsulation (voir [89]).

¹⁹ Un exemple de calendrier au Royaume-Uni : Berkeley, 27 hectares 'Key activities 2013-2014: Continue retrieval activities in the active waste vaults and cesium removal plant. 2021: Site enters Care and Maintenance. 2070: Final site clearance achieved: 2019'.

L'ordonnancement de l'ensemble des démantèlements du parc devra définir des **étapes techniques opérationnelles et mesurables**²⁰.

5.5. Caractéristiques volumiques, massiques, thermiques, radioactives (classées par nature des radiations, gamma, bêta, alpha, neutrons)

La tâche est ample. Il faut considérer le programme général, le calendrier, l'ordonnancement de commandes, des travaux, des financements, des écarts projets/réalisation, la radioprotection, l'organisation de la cohérence des chantiers, etc. De plus, la visualisation des contraintes d'encombrement stérique, particulièrement en situation post-accidentelle, nécessite de concevoir et de réaliser les **outils informatiques et numériques** adéquats qui iront de la simple base de données jusqu'à des outils de réalité virtuelle.

5.6. Spécificité des situations accidentelles

L'ensemble des réacteurs étudiés dans ce chapitre concerne les centrales nucléaires et leurs installations de cycle du combustible, arrivés en fin de vie, et arrêtés suivant les **procédures normales**. On peut se demander ce qu'il y a de commun entre les situations physiques, chimiques, mécaniques associées à leur démantèlement et la remise en catégorie libre d'emploi des réacteurs arrêtés suite à un **accident**. Nous avons donné une liste de ces réacteurs en annexe. Une référence pour le cas de Fukushima Daiichi est donnée en [60]. Pour ceux-ci, retirer les combustibles usés éventuellement endommagés, en quelque sorte de manière contrainte, entraîne des interactions entre les opérations de démantèlement et l'aval du cycle de combustible. Ces durées d'interaction sont de plusieurs décennies afin que la diminution de la radioactivité permette la poursuite des activités de démantèlement. Avant même que le démantèlement puisse commencer, la sécurisation du chantier post-accident est une étape essentielle, rendue parfois difficile par la destruction des routes, palans, véhicules habituellement utilisés. La gestion d'effluents contaminés, résultant du contact d'eau de pluie avec les éléments de centrale endommagés, est un problème qui est perçu de façon aiguë dans le cas du chantier de Fukushima.

²⁰ Ainsi, dans l'exemple des magnox du Royaume-Uni, *care and maintenance*, *safestore*, etc. sont de telles étapes.

Doit-on aller plus loin et observer qu'il faudra de toute façon évacuer les déchets radioactifs du chantier de démantèlement, vers un (ou des) **entreposage(s)**, puis vers un (ou des) **stockage(s)**, le calendrier de ces opérations lourdes et complexes dépendant de l'intensité de la radioactivité et de ses durées caractéristiques (nature des désintégrations, alpha, bêta, gamma, émission de neutrons, etc., et demi-vies des isotopes) ?

Le démantèlement d'**un seul réacteur** est ainsi lié à l'aval du cycle des combustibles de la **totalité du parc électronucléaire** français. Il y a aussi **interdépendance** entre les activités de démantèlement et l'entreposage et le stockage des différentes catégories de corps radioactifs. Cela implique donc des mises en commun des infrastructures, des équipements, des manutentions, des transports des types de colis (et donc de conteneurs), de l'instrumentation, des normes de radioprotection, etc.

Encadré 3 – Un autre effet de série des 58 REP (34 × 900 et 24 × 1300), des combustibles pour le démantèlement

Nous avons constaté dans l'encadré 1 que sept **effets de série** entre les REP du parc nucléaire français concernaient l'ingénierie de leur démantèlement. Cette observation s'étend aussi aux éléments combustibles. Les 58 réacteurs du parc nucléaire de la France sont de conception, de réalisation, d'évolution des perfectionnements analogues (voir document 113, page 287 de [2]), y compris quand on prend en compte que le parc comporte 34 REP 900²¹ et 24 REP 1300. Ajoutons que cette analogie est vraie aussi pour les **turbines**, les **alternateurs**, les **transformateurs**, les **condenseurs**, les **générateurs de vapeur**, les **pompes**, les **vannes**, les « **pressuriseurs** », les **systèmes de contrôle commande**, les **purgeurs**, etc., ce qui facilite plus encore leur traitement. Cet effet de série oblige à considérer le **démantèlement comme un tout pour les 58 REP**, s'étalant sur plusieurs décennies.

Au terme des sections précédentes, nous constatons qu'un ensemble de recherches scientifiques et techniques est aussi à effectuer. Il est, lui aussi, commun à tous les démantèlements des 58 REP. Cette recherche bénéficie

²¹ Les 34 REP 900 sont situés dans les centrales de Blayais, Bugey, Chinon, Cruas, Dampierre, Fessenheim, Gravelines, Saint-Laurent, Tricastin. Les 24 REP 1300 sont situés sur Belleville, Cattenom, Chooz, Civaux, Flamanville, Golfech, Nogent, Paluel, Penly, Saint-Alban. Rappel : il y a actuellement 12 réacteurs en cours de démantèlement, dont 1 REP.

elle aussi d'un effet de série : **la recherche pour améliorer ce démantèlement bénéficiera aux 58 réacteurs des 19 sites de centrales**. Une fois de plus, nous devons souligner que **les activités de démantèlement en France sont un cas très particulier dans le monde**, pour ce qui est des centrales nucléaires à eau.

6 | Sciences et techniques du démantèlement²²

6.1. Évaluation de l'état radiologique de chaque installation nucléaire : le terme source de radioactivité

Il est nécessaire pour chaque site de démantèlement de déterminer :

- la composition de la source radiologique dans le chantier, sa répartition dans l'installation, les sols, les sous-sols, les nappes souterraines ;
- son transport spontané (par exemple par les pluies, les vents, les événements météorologiques et géophysiques) ;
- sa variation, la possibilité de la manipuler, sa séparabilité ;
- l'état initial du site, l'état en cours de décontamination (avec les grandes étapes visées ou/et déjà réalisées), l'état final ;
- l'activation des bétons (voir [32]) ;
- la radioactivité et la puissance résiduelle locale²³ et globale.

²² Un texte de la NRC (Nuclear Regulation Commission, États-Unis) décrit, pour le public, la réponse à la question : 'How is a nuclear power plant decommissioned? Decommissioning involves removing the spent fuel, dismantling any systems or components containing activation products (such as the reactor vessel and primary loops) and cleaning up or dismantling contaminated materials from the facility. All activated materials, generally have to be removed from the site and shipped to a waste processing storage, or disposal facility. Contaminated materials may either be cleaned of contamination on site; the contaminated sections may be cut off and removed (leaving most of the components intact in the facility); Or they may be removed and shipped to a waste processing, storage or disposal facility' [51].

²³ Tant qu'il resterait des combustibles usés en cours de refroidissement sur un chantier de démantèlement d'un réacteur nucléaire de puissance, la source chaude (thermique) locale la plus élevée du site serait dans les pastilles d'oxyde d'uranium (ou plutonium) irradié. Les radioactivités dues aux radiations gamma émises par les produits de fission, les isotopes du plutonium et des actinides mineurs, sont de l'ordre de quelques dixièmes de curies par gramme de combustible au bout de **1 heure**. La puissance résiduelle (thermique) est alors d'environ 1,5 watt par gramme. Elle sera réduite :

- à 0,6 % de la puissance nominale lors de l'arrêt (le watt/gramme) au bout d'**un jour** ;
- à 0,3 % (0,5 watt/gramme) au bout d'**un mois** ;

Encadré 4 – Les proportions des déchets radioactifs de démantèlement des réacteurs du parc français, relativement aux déchets du cycle de combustible et des autres sources de déchets

La somme de toute la radioactivité (donc de déchets radioactifs) d'un site de centrale REP du parc français, une fois les combustibles usés retirés de ce site, est d'environ 10^{18} becquerels, soit $3 \cdot 10^7$ curies. La somme en volume est d'environ 300 000 m³, et la somme en masse d'environ **800 000 tonnes**. Environ un tiers de ce volume provient de la partie dite « à accès contrôlé » (l'îlot nucléaire – « *controlled area* »²⁴), soit environ 100 000 m³, de masse environ **260 000 tonnes**. Dans la partie à accès contrôlé, environ 55 000 tonnes sont des matériaux contaminés. Dans ces matériaux contaminés, un peu moins de la moitié provient des composants métalliques de la chaudière nucléaire et un peu moins de l'autre moitié provient du béton et des débris de démolition. Nous renvoyons pour les évaluations numériques²⁵ détaillées aux références [130] et [131], pour les volumes et pour les radioactivités à [2] (voir aussi [116, 132, 138]).

Retenons déjà que :

- les proportions de ces déchets radioactifs, en TFA et FMA-VC, relativement à tous les déchets du site de démantèlement, sont de 93 % en volume.

– à 0,18 % (0,3 watt/gramme) au bout d'un an.

La puissance thermique résiduelle en pourcentage de la puissance nominale avant l'arrêt, dépendant de l'irradiation depuis le début du dernier chargement, ainsi que le détail des désintégrations nucléaires des radionucléides conduisant à ces nombres, sont exposés dans l'encadré 2 de [38].

La chaleur spécifique étant de 0,222 joule/°K (voir [29], page 45), si le combustible n'est pas refroidi, il monte à 1 000 °C en environ 10^3 secondes [77]. Rappelons, pour avoir en tête les ordres de grandeur, que, au bout d'un an après la sortie de réacteur, donc de la réaction en chaîne de fission, la puissance résiduelle du combustible est tombée à quelques dizaines de watts par gramme de combustible.

Ci-après, nous avons pris le cas du réacteur n° 1 de la centrale accidentée de Fukushima Daiichi [34] : *Immédiate* (après 1 seconde) : 6,6 % ; après 1 minute : 3,21 % ; après 1 h et 12 min : 1,73 % ; après 1 jour : 0,6 % ; après 20 jours : 0,37 % ; après 1 an : 0,21 % (voir les documents 23 à 26, des pages 220-221 de [2], voir [105]).

²⁴ *Controlled area* : la définition officielle est 'a defined area in which specific protection measures and safety provisions are or could be required for controlling exposures or preventing or limiting the spread of contamination in normal working conditions, and preventing or limiting the extent of potential exposures'.

²⁵ La référence allemande [116], qui étudie le démantèlement de tout le parc nucléaire de puissance de cette nation, donne page 79, 'figure 4.3; – typical distribution of the entire decommissioning mass', les nombres suivants en pourcentage des masses : '92 % : clearance; – 6 % :

Nous les regroupons car ces catégories peuvent être stockées au CSF MA-VC²⁶ de Soulaines (Aube) et au CST VA de Moronvilliers ;

- en FA-VL : 5 % en volume ;
- les MA-VL constituent 2 % du volume de tous les déchets radioactifs cumulés sur le site de démolition. Ces catégories de déchets radioactifs devraient pouvoir être stockées au CIGEO²⁷ ;
- les déchets de haute activité (HA), constituent moins de 0,005 % en volume de tous les déchets radioactifs du site. Ces catégories devraient pouvoir être stockées au CIGEO.

Quelques catégories particulières de déchets radioactifs d'un site de démantèlement :

- le **graphite irradié** de l'ensemble des réacteurs UNGG constitue un volume de 23 000 tonnes pour les UNGG du parc EDF, Areva et CEA (centre de Marcoule), soit 80 % en volume des déchets FA-VL. Avec l'hypothèse de colis d'un volume de 10 m³, cela fait un volume total 100 000 m³ ;
- les matériaux de la cuve ne sont radioactifs qu'à la couronne interne ;
- les absorbants du contrôle-commande sont fortement radioactifs ;
- les déchets tritiés de Brénilis-EL4, provenant des captures de neutrons par le deutérium de l'eau lourde, sont en cours de traitement. Rappelons la difficulté de traiter aussi les autres catégories de déchets tritiés (dont les fissions ternaires qui s'échappent lors d'un endommagement de gaine ou un accident de fusion du cœur, ou lors du retraitement et des captures par le fluide caloporteur. Le chantier de Fukushima en est une grave illustration).

Il faut mettre au point :

- les procédés d'identification des isotopes des actinides, des produits de fission, des activations des matériaux de structure, des impuretés (à l'état de trace activées dans les matériaux) ;
- l'instrumentation pour évaluer ces états radiologiques ;
- les techniques d'échantillonnages ;

reusable after treatment; – 2 %: radioactive waste for disposal'.

²⁶ CSF MA-VC : Centre de stockage de faible et moyenne activité à vie courte, situé dans l'Aube.

²⁷ CIGEO : Centre industriel de stockage géologique.

Encadré 5 – Quelques exemples²⁸ des corps radioactifs²⁹ présents³⁰ dans les installations nucléaires en fin de vie, quand on a évacué la totalité des éléments combustibles usés [31]

Une **première** catégorie de matériaux radioactifs constituant la source radioactive comporte les **matériaux de structure**³¹ **amovibles** avec les équipements existants (couvercle, échangeurs de chaleur, pompes, vannes, purgeurs, barres de contrôle, « pressuriseur », etc.).

Fer : les isotopes stables du fer sont le 54 (5,8 %), le 56 (91,7 %), le 57 (2,1 %) et le 58 (0,28 %) à partir desquels, des captures (n, γ) ont lieu dans le cœur du réacteur ; par exemple, le **fer 55** (β^- de 0,04 à 3,4 MeV) : demi-vie de **2,685 ans**, produit par la réaction (n, γ) sur le fer 54. Les isotopes ainsi obtenus sont : fer 59 (β^- de 1,5 MeV) : 44,6 jours, produit par la réaction (n, γ) sur le fer 58, devient le cobalt 59, stable.

Nickel : les isotopes stables du nickel sont le 58 (67,01 %), le 60 (22,2 %), le 61 (1,13 %), le 62 (3,6 %), le 64 (0,92 %). Il en résulte des réactions (n, γ) conduisant aux isotopes Ni 58 (n, γ) $\rightarrow$ Ni 59, Ni 59 (n, α) $\rightarrow$ Fe 57, ce qui est une des voies de production d'hélium **63 Ni** demi-vie (β^- de 0,06 MeV) : **100 ans**, produit par la réaction (n, γ) sur le nickel 62. Dans un des REP arrêtés du parc EDF, Chooz, la quantité de nickel 63 cumulée, corrigée de la décroissance radioactive a été mesurée comme environ 10^6 curies. Chaque colis d'embout contient environ 86 kg de chrome, 56 kg de nickel 59 Ni : demi-vie : 79 000 ans.

Cobalt : le seul isotope stable est l'isotope 59. La capture (n, γ) conduit à **60 Co** demi-vie (β^- de 0,3 à 1,27 MeV) : **5,27 ans**, produit par réaction (n, γ) sur le **Co 59**. Le cobalt 60 est rejeté tant parmi les effluents du parc nucléaire (petite quantité) que par les usines de retraitement comme celle de Sellafield (environ 2 curies par an, rapidement diminué par la décroissance radioactive).

²⁸ Toutes les données nucléaires citées sont celles de [21], [30] et [74].

²⁹ Signification des symboles des corps cités : Mg : magnésium, Cl : chlore, Mn : manganèse, Co : cobalt, Ni : nickel, Se : sélénium, Sr : strontium, Nb : niobium, Mo : molybdène, Tc : technétium, Pd : palladium, Sn : étain, I : iode, Cs : césium, C : carbone, Zr : zirconium, Sm : samarium, Ru : ruthénium, U : uranium, Pu : plutonium, Np : neptunium, Am : américium, Cm : curium.

³⁰ Une liste des radionucléides émis et déposés suite à l'accident de Fukushima est exposée dans [46] et [57].

³¹ Il est important de concevoir des matériaux de structure du cœur à activation par les neutrons du cœur aussi réduite que possible. Un exemple en est l'acier dit EUROFER. Les corps traces qui peuvent être activés sont : niobium, molybdène, nickel, cuivre, aluminium, titane, silicium, cobalt, etc. Ainsi, la teneur massique maximale en niobium doit être inférieure à 0,11 ppm, molybdène inférieur à 1 ppm, nickel inférieur à 10 ppm, cuivre inférieur à 10 ppm, aluminium inférieur à 1 ppm, titane inférieur à 200 ppm, silicium inférieur à 400 ppm, cobalt inférieur à 10 ppm [63, 64].

Chrome : les isotopes stables sont le 50 (4,3 %), le 52 (83,7 %), le 53 (9,5 %), le 54 (2,3 %). Les captures (n, γ) conduisent à des isotopes du Cr à des demi-vies très courtes (ainsi que leurs descendants, isotopes du vanadium), comparées aux délais du démantèlement.

Niobium : le seul isotope stable est le 93, qui par la réaction (n, γ) $\rightarrow$ 94 Nb de demi-vie (β^-) : 20 000 ans dont les propriétés physicochimiques font problème.

Le **manganèse 55** est le seul isotope stable. L'isotope **53 Mn** a une demi-vie (β^- 3,4 MeV à 0,37 MeV) de $3,74 \cdot 10^6$ ans. L'isotope **54 de Mn**, de demi-vie de 312 jours.

Une **deuxième** catégorie comporte les constituants de **structure non amovibles** (cuve, piscine, circuits soudés des fluides, etc.).

Ces isotopes radioactifs produits par l'irradiation [33] des matériaux de structures et des « constituants trace³² irradiés » sont notamment :

53 Mn : demi-vie : $3,7 \cdot 10^6$ ans.

54 Mn : demi-vie : 312,2 jours.

93 Mo : demi-vie β^- (de 0,9 à 3,6 MeV) : 3 500 ans, produit par la réaction (n, γ) sur Mo 92, de teneur isotopique 14,77 %. Les autres isotopes stables de Mo sont les isotopes 94 (9,23 %), 95 (15,9 %), 96 (16,6 %), 97 (9,5 %), 98 (9,6 %).

94 Nb : demi-vie β^- : 20 000 ans.

63 Ni : demi-vie : 100 ans.

59 Ni : demi-vie : 79 000 ans.

60 Co : demi-vie : 5,27 ans.

14 C : demi-vie : 5 730 ans.

36 Cl : demi-vie : $3,02 \cdot 10^5$ ans. Émetteur β d'énergie maximale 0,71 MeV.

Rassemblons dans une **troisième** catégorie d'autres matériaux radioactifs³³, tels que :

- les composés du tritium (eau tritiée) ;

³² Par exemple, les impuretés de chlore dans le graphite qui, irradiées, constituent le ³⁶Cl.

³³ Voir dans [2] les documents 8 (respectivement 10, 11, 15, 18, 84 à 86) de la page 208 (respectivement, 210 à 215, 268-269).

- les graphites contenant du chlore³⁴ ^{36}Cl : ^{36}Cl , demi-vie $3,01 \cdot 10^5$ ans ;
- le C 14. Ainsi, dans le graphite irradié des 6 UNGG du parc électro-nucléaire français, la radioactivité du ^{36}Cl est environ 10 fois celle du tritium et 100 fois celle du C 14 ;
- Sb (antimoine) ^{125}Sb de demi-vie β^- de 2,77 ans.

Les structures en **béton** jouent un rôle de radioprotection (*shielding*). Les noyaux lourds nécessaires pour les fonctions d'ingénierie, les noyaux trace issus des stades de fabrications, etc., donnent lieu à des activations par les neutrons fuyant du cœur du réacteur (environ 2 % par neutron de fission³⁵ naissant dans le cœur : voir le document 123, page 295 de [2]). Parmi ces noyaux radioactifs du béton en cours de démantèlement, provenant de capture d'un neutron par les noyaux cobalt 59, baryum 132, césium 133, europium 153, holmium 155, ceux qui posent le plus de problèmes pour la radioprotection sont (voir la table 16, page 55 de [132]) : cobalt 59 (100 % du cobalt naturel) → cobalt 60 (demi-vie 5,27 ans) ; baryum 132 (0,01 % du Ba naturel) → baryum 133 (demi-vie 10,5 ans) ; césium 133 (100 % du césium naturel) → césium 134 (demi-vie 2,1 ans) ; europium 151 (47,8 % de l'euporium naturel) → europium 152 (demi-vie 13,33 ans) ; europium 153 (52 % de l'euporium naturel) → europium 154 (demi-vie 8,8 ans) ; holmium 165 (100 % de l'holmium naturel) → holmium 166 (demi-vie 1 200 ans).

- les laboratoires spécialisés pour ce faire³⁶ ;
- les mesures de radioactivité et la dosimétrie ;
- les mesures des sources de rayonnement α , γ .

Encadré 6 – Corps radioactifs dans le cas où des éléments combustibles usés seraient encore présents sur le site de démantèlement

Dans le cas où il reste des **éléments combustibles usés** sur le site de démantèlement d'un réacteur, soit parce qu'on n'a pas trouvé où les évacuer, soit qu'il y ait eu un incident au cœur du réacteur qu'on veut démanteler, les sources principales de radioactivité provenant de ces combustibles usés sont :

³⁴ La chimie du chlore (structure électronique : $3s^2 3p^5$) en fait un élément très mobile. Il est difficile à traiter, et donc à décontaminer (communication de R. Guillaumont et notamment [78]).

³⁵ Voir [61, 127, 128].

³⁶ Par exemple, l'ITU, Institut des transuraniens de Karlsruhe (Union européenne).

Une première catégorie comporte les produits de fission^{37 38 39} (voir [34]) :

137 Cs : demi-vie 30 ans	93 Mo : demi-vie 3 500 ans
90 Sr : demi-vie 29,1 ans	99 Tc : demi-vie : $2,1 \cdot 10^5$ ans
94 Nb : demi-vie $2,3 \cdot 10^4$ ans	131 I : demi-vie : 8,02 jours
99 Tc : demi-vie $2,13 \cdot 10^5$ ans	129 I : demi-vie : $1,57 \cdot 10^7$ ans
129 I ⁴⁰ : demi-vie $1,57 \cdot 10^7$ ans	106 Ru (ruthénium) : demi-vie β -376 jours. Sa chimie [67] en fait un cas particulier lors du retraitement. Il doit être séparé et rejeté dans les effluents liquides.
107 Pa : demi-vie $6,5 \cdot 10^6$ ans	126 Sn (étain) : demi-vie $1 \cdot 10^5$ ans
93 Zr : demi-vie $1,53 \cdot 10^6$ ans	147 Sm : demi-vie $1,0 \cdot 10^{11}$ ans
135 Cs : demi-vie $2,3 \cdot 10^6$ ans	
93 Zr : demi-vie $1,5 \cdot 10^6$ ans	

³⁷ La masse de produits de fission engendrée dans une tonne d'uranium enrichi à 3,25 %, irradiée dans un REP irradié à 33 GW·jour/tonne métal lourd initial, est de 33,9 kg/tonne (dont 3,5 kg de Zr, 3,2 kg de Mo, 0,9 kg de Sr, 0,36 kg de Kr, 0,77 kg de Tc, 2,4 kg de Ru, 1,1 kg de Pd, 0,22 kg d'I, 0,45 kg de Te, 5,3 kg de Xe, 2,7 kg de Cs). Ces masses de produits de fission à sortir du chantier ne posent donc pas de problèmes techniques. Ce sont les **radioactivités** qui entraînent des difficultés. C'est pour ne pas la disperser qu'on **dilue** les produits de fission d'un facteur 100 (rien qu'en les laissant dans l'uranium irradié) à 1 000 (en les plaçant dans des verres).

³⁸ Les corps cités dans cette note comme produits de fission (en suivant le vocabulaire usuel des publications scientifiques), sont plus précisément des **descendants radioactifs bêta** des produits de fission directement issus d'une fission. Par exemple, le 137 Cs est le descendant de 137 I (demi-vie 24 secondes) → 137 Xe (demi-vie 3,9 minutes) → 137 Cs (demi-vie 30 ans) → baryum (demi-vie stable).

³⁹ Nous citons des produits de fission tels que le césium à propos d'activités de **démantèlement de réacteur nucléaire sans accident**, que nous appelons aussi en fonctionnement nominal.

1. En effet, pendant l'irradiation d'un crayon, en fonctionnement nominal, il arrive qu'une **gaine de combustible** présente un **défaut d'étanchéité**, telle qu'une fissure de taille microscopique (en moyenne, une fois par an et par REP). Des produits de fission gazeux (krypton, xénon, etc.) ou volatils (césium, strontium, etc.) peuvent alors être entraînés par le flot du circuit primaire et être déposés sur les parois des circuits, des pompes, des vannes, etc., hors du réacteur [77].
2. Un autre type d'incident est la **radiolyse de l'eau**, suite à un contact eau/combustible.
3. Des **seuils** au-delà desquels le réacteur doit être arrêté sont définis par des normes (i.e. : 0,03 curies/kilogramme d'eau).

⁴⁰ Il y a une différence considérable entre les produits de fission présents dans le cœur d'un REP en fonctionnement et ceux éventuellement présents pendant le démantèlement. Ainsi, les isotopes de l'iode présents dans un REP en fonctionnement seraient le 127, 128, 129, 130m, 130f, 131 (10^8 curies), 132m, 132f, 133m, 134m, 134f, 135, 136m, 136f, 137, 138, 139, 140, 141 (voir document 76, page 262, de [2]). Quand le réacteur aurait été arrêté, il ne resterait plus que l'iode 127 stable (2,2 kg), l'iode 129 (9,6 kg, de demi-vie $1,6 \cdot 10^7$ ans), l'iode 131 (0,6 kg, de demi-vie 8,04 jours). Donc pendant le chantier, l'iode 131, au tout début, et l'iode 129 (2 curies) pendant toute la durée du chantier sur le site, doivent être stockés soigneusement.

79 Se (sélénium) : demi-vie β 4,8·10 ⁵ années	151 Sm : demi-vie 90 ans
87 Rb : demi-vie 6·10 ¹⁰ ans	125 Sb (antimoine) : demi-vie β - de 2,77 ans ⁴¹

Parmi les produits de fission⁴² présents dans les éléments combustibles d'un réacteur que l'on arrête, mentionnons les **produits de fission gazeux** (xénon 133, 4,3 % ; xénon 135, 6,4 % ; krypton 85, 1,30 %) qui suivront le destin des éléments combustibles déchargés, quels que soient ces devenirs. Citons le **krypton 85**⁴³, de demi-vie (β - de 0,6 MeV) de **10,7 années**, Les gaz de fission sont sous forte pression due à leur accumulation. En fin d'un cycle du combustible, la radioactivité du Kr 85 contenue dans le combustible est de l'ordre de 10⁶ curies. Pour une usine de retraitement comme celles de Sellafield ou de La Hague, les rejets annuels de ces gaz de fission sont de l'ordre de 10⁷ curies. Dans un chantier de démantèlement, ces gaz sous pression seront présents dans tous les éléments combustibles tant que ceux-ci demeureront sur le site.

⁴¹ Le panache marin des rejets des usines de séparation chimique est suivi par les mesures de l'antimoine 125, dans la mer du Nord, jusqu'au long des côtes des nations scandinaves [76, 110].

⁴² On peut se demander s'il serait possible **transmuter** les produits de fission (ou certains d'entre eux, soit à cause de leur faculté de migrer dans les sols, soit à cause de leur demi-vie comme l'iode 129 ou le césium 135) en corps stables. Une première possibilité serait de constater que ces isotopes sont dans le **flux de neutrons des cœurs des REP** (3·10¹⁴ neutrons/cm².seconde) et y restent pendant la durée d'un cycle de, par exemple, 3 ans d'utilisation de la réserve de réactivité du combustible chargé en réacteur. Les durées d'irradiation à puissance nominale pour transmuter la moitié de ces produits de fission seraient, respectivement : Se 79 : 18 ans ; Zr 93 : 78,5 ans ; Tc 99 : 13,2 ans ; Pd 107 : 26 ans ; Sn 126 : 2 800 ans ; I 129 : 30,5 ans ; Cs 135 : 30 ans ; Cs 137 : plusieurs milliers d'années. Constatons que cette opération est impossible avec les connaissances et les technologies actuelles. Si on envisageait de séparer ces produits de fission et de les transmuter dans un flux **de neutrons rapides** (avec, par exemple, un flux de neutrons de 4·10¹⁵ neutrons/cm².seconde), ces durées deviendraient respectivement : Se 79 : 59,5 ans ; Zr 93 : 48,1 ans ; Tc 99 : 8,7 ans ; Pd 107 : 5,3 ans ; Sn 126 : 740 ans ; I 129 : 14,8 ans ; Cs 135 : 25,6 ans ; Cs 137 : 240 ans. Constatons que ce dessein n'est pas plus réaliste. La seule issue pour des éventuels produits de fission, dans le cas d'un démantèlement de réacteur gravement endommagé (c'est le cas pour les sites de Three Mile Island, Tchernobyl, Fukushima), serait donc de les stocker définitivement, en veillant à les refroidir continuellement jusqu'à ce que leur puissance thermique puisse être évacuée passivement (voir les documents 23, 24, 25, 26, 43, 44, 45, pages 220, 221, 229, 230 de [2]). En attendant cette possibilité, un entreposage dans un conteneur refroidi passivement par gaz pourrait rester sur le site de démantèlement jusqu'à ce qu'il soit suffisamment refroidi pour être transportable sur le site de retraitement.

⁴³ La chaîne conduisant au Kr 85 est : le produit de fission : sélénium (demi-vie : 40 secondes) → brome 85 (demi-vie 3 minutes) → Kr 85 + (demi-vie : 4,4 heures) → 0,225 Kr 85 (demi-vie : 10,7 ans) → rubidium 85 stable.

Une troisième catégorie⁴⁴ comporte les actinides⁴⁵ (voir [34] et [85]) :

239 Pu : demi-vie $2,411 \cdot 10^4$ ans [28, 29]	Dans le cas de cycle du combustible au thorium, il faut y ajouter :
239 Np : demi-vie 2,365 jours	232 Th (thorium) ⁴⁶ : demi-vie $1,4 \cdot 10^{10}$ ans
240 Pu : demi-vie 6 563 ans	233 Th : demi-vie 22 minutes
241 Pu : demi-vie 14,36 ans	232 U : demi-vie 68,9 ans
238 Pu : demi-vie 87,74 ans	233 Pa : demi-vie 27 jours
237 Np : demi-vie $2,144 \cdot 10^6$ ans	233 U : demi-vie $1,59 \cdot 10^5$ ans
241 Am : demi-vie 432,2 ans	210 Po : demi-vie 138 jours
244 Cm : demi-vie 18,1 ans	208 Tl (thallium) : demi-vie 3 minutes
234 U : demi-vie $2,45 \cdot 10^5$ ans	
236 U : demi-vie $2,34 \cdot 10^7$ ans	

6.2. Éléments nouveaux du démantèlement comparés aux activités nucléaires pratiquées depuis les années quarante et cinquante

Une des difficultés du démantèlement des réacteurs à eau sous pression provient de la différence fondamentale des critères pour l'optimisation des diverses activités nucléaires concourant à la production d'énergie électrique.

⁴⁴ On peut s'interroger sur le sort de ces **actinides**, pendant le démantèlement d'une centrale. Une possibilité étudiée est de les utiliser comme combustible de la fission dans les réactions en chaîne. Cela a été démontré pour les isotopes du plutonium [33]. L'aspect tenue de la substance (par exemple, un oxyde) contenant l'actinide en flux de neutrons a été démontré pour l'américium (expériences de superfact dans le réacteur Phénix [125]). C'est dire que le sort préférable pour les actinides qui seraient encore sur le site est de les envoyer tous, dès que possible, à l'usine de retraitement, afin d'en fabriquer des cibles à irradier, si cette opération est réaliste.

⁴⁵ Aux isotopes 234 et 236 de l'uranium près, ces actinides proviennent tous des irradiations [38] successives de l'isotope 238 de l'uranium naturel. Ils sont, pour la plus grande partie, issus des MOX irradiés (voir document 11 page 210, document 15 page 212, document 17 page 216, document 23 page 220, document 25 page 221, de [2]). Leur puissance thermique est substantielle. Elle impose donc des délais de refroidissement. Ce phénomène sera aussi à prendre en compte par les autres producteurs d'électricité ayant irradié des MOX : Royaume-Uni, Suède, Allemagne, Japon, Belgique...

⁴⁶ Les isotopes **en italique** sont associés au cycle du thorium (voir [85]).

1. **La conception de la cuve du réacteur** (voir [40]), qui vise à faire coexister dans un volume minimum plusieurs fonctions : réaction en chaîne stable, contrôle-commande du réacteur, maintien de la criticité du cœur pendant que la variation de la réactivité causée par la disparition progressive des noyaux fissiles et l'augmentation des noyaux stériles absorbants fait diminuer progressivement cette part de la réactivité, chargement et déchargement des éléments combustibles, efficacité des barres de contrôle à assurer en toutes situations, maintien de la qualité de la première barrière que constitue les gaines des crayons combustibles, formation d'écoulements laminaires dans chaque canal adjacent aux crayons combustibles, maintien d'une circulation du caloporteur pour évacuer la puissance résiduelle en cas d'arrêt du réacteur, etc.
2. **Les nécessités du démantèlement** de cette partie de l'îlot nucléaire. Il s'agit avant tout sur un tel chantier de découpler tous les composants du réacteur, pour assurer à chacun d'entre eux le meilleur outillage, la meilleure radioprotection, la durée minimale de l'opération sur chaque composant.

La longue liste de **1**, comparée à la brève phrase de **2**, résume de fait la dissemblance⁴⁷ des fonctions 1 et 2 à assurer, successivement, dans la durée. Ces contrastes sont commentés dans l'encadré 7.

Encadré 7 – Dissemblance entre conception du réacteur pour un fonctionnement nominal et contrainte de démantèlement

La fonction de réaction nucléaire de fission en chaîne avec modération par les noyaux de l'hydrogène de l'eau liquide, pour les REP, entraîne un cœur très dense comportant 193 assemblages de combustibles (cas du REP 1300). Il faut confiner les produits de ces fissions. Trois barrières y participent : la gaine du combustible, la cuve du réacteur et l'enceinte de confinement (le dôme de cette enceinte, pour le cas du REP 1300 de Flamanville, pèse 260 tonnes). Lors du démantèlement, les gaines seront évacuées avec les combustibles usés.

⁴⁷ Il existe un autre tri qui se joue aussi dans la durée de la vie du réacteur : provoquer des fissions dans un isotope d'actinide, c'est transformer un noyau à demi-vie très longue en deux noyaux avec un excédent de nombre de neutrons relativement à la ligne de stabilité, donc subissant jusqu'à 4 à 5 désintégrations bêta avec des demi-vies de l'ordre de la seconde jusqu'à des années (sauf les exceptions à demi-vie longue : I 129, Tc 99, Cs 135, Pd 107, Zr 93, etc.). Les neutrons issus de ces fissions vont activer les matériaux de structure en des noyaux radioactifs bêta, voisins de la ligne de stabilité, de demi-vie se comptant en années. En résumé, pendant le fonctionnement nominal, on est parti de matériaux à demi-vie longue et on a abouti à des matériaux de demi-vie courte. On a concentré dans le temps. Au contraire, pendant le démantèlement, on sépare les corps radioactifs, candidats au statut de déchets entre vie longue, vie moyenne et vie courte.

Pour assurer la fonction d'évacuation de l'énergie thermique (3 800 MW thermiques, cas du REP 1300) hors du cœur du réacteur, à une température aussi haute que possible, il faut créer et maintenir une pression du fluide caloporteur, l'eau, d'environ 155 bars, ce qui permet une température de sortie de l'eau du réacteur de 330 °C⁴⁸ (entrée à 293 °C). Ceci entraîne qu'il faut une épaisseur de **cuve** de 22 cm pour résister à cette pression.

Pour que le rayonnement gamma issu du cœur ne détériore pas trop le matériau (acier inoxydable) de la cuve, il faut l'absorber par une épaisseur de matériau entre le cœur et la cuve. Ceci augmente encore le diamètre de la cuve. Il reste à évacuer cette gigantesque cuve (hauteur de 12 mètres, diamètre interne de 4,4 m, masse de 330 tonnes).

Pour évacuer la cuve, il va falloir enlever le couvercle (masse : 130 tonnes), en extraire toutes les structures internes, très radioactives, la découper, manutentionner les morceaux avec des appareils de levage, les entreposer sur le site, puis les évacuer vers un entreposage provisoire (voir [113]). La fonction de contrôle-commande du réacteur est assurée par 57 barres absorbantes (donc très radioactives) commandées par des mécanismes placés en haut de la cuve, attachés au couvercle, afin de bénéficier de la force de gravité en cas d'incident sur l'insertion dans le cœur. Il faut enlever ce couvercle et en démonter les divers équipements pour pouvoir travailler sur le découpage de la cuve. Les 57 barres de contrôle d'un REP 1300 ne doivent pas pouvoir remonter et un verrouillage passif doit les maintenir. Ces barres ont recueilli la radioactivité des matériaux absorbants. Leurs mécanismes de guidage doivent être rigides et souples à la fois. Il faudra développer les moyens de détection à distance, de travail à distance, de manutention et d'entreposage spécifique.

La fonction de transfert de chaleur du fluide primaire (qui peut avoir été contaminé) à un fluide qui ira vers la turbine et la traversera est assurée par les échangeurs de chaleur. Là se rencontrent la très haute énergie d'origine nucléaire et les capacités de transfert de la chaleur thermique classique, qui sont très inférieures. Ce contraste se solde par une très grande surface d'échange et donc un gigantisme des échangeurs de chaleurs, chef-d'œuvre de chaudronnerie. Leur surface intérieure peut être contaminée. Il va falloir les décontaminer, les découper, les « coliser », sur le site, et les évacuer vers un entreposage transitoire. Pour donner un ordre de grandeur des travaux de démantèlement hors de l'îlot nucléaire, signalons que chaque **générateur de vapeur** d'un PWR a une masse d'environ 300 tonnes.

⁴⁸ Cette température de sortie du réacteur permet une température d'entrée dans la turbine de 285,3 °C, et un rendement de 34,6 % (tous ces nombres sont donnés dans la référence [100]).

La radioactivité totale, au bout d'une vingtaine d'années, d'un générateur de PWR est d'environ 300 curies. Elle se décompose en : cobalt 58, 82 % ; Co 60, 9 % ; Ni 63 : 9 % ; Ni 63 : 9 % ; Fe 55 : 9 %. La dose⁴⁹ dite collective⁵⁰ du personnel participant à une telle opération de démolition d'un générateur de vapeur de PWR, est d'environ 70 homme-millisievert (c'est une référence expérimentale à choisir pour minimiser toute possibilité de risque expérimental, afin qu'elle soit inférieure à ce que le vivant reçoit des processus naturels géologiques).

La masse de chaque **bouilleur des Magnox** du Royaume-Uni est de 310 tonnes. Leur radioactivité est, au bout d'une vingtaine d'années de refroidissement, d'environ 1 curie, dont 35 % venant de tritium, 13 % venant du C14, 10 % du C14, 3 % venant du Ni 59, autant du Ni 63 et 3,5 % du Fe 55.

Le délai de 20 ans permet la décroissance du tritium (demi-vie 12 ans), du cobalt 60 (demi-vie 5,27 ans), du fer 55 (demi-vie 2,7 ans).

Le lecteur peut s'interroger sur l'existence de **différences qualitatives** entre les déchets radioactifs issus d'un chantier de démantèlement et ceux issus du cycle de combustible. Quelques éléments sont donnés dans l'encadré 8.

Encadré 8 – La cuve, deuxième barrière de la radioactivité et handicap majeur de la déconstruction

La cuve est partiellement protégée des rayonnements du cœur (i.e. les émissions de neutrons) et des γ . Sa grande épaisseur (22 cm) comparée à la distance d'atténuation des γ dans son matériau (i.e. 0,0595 cm²/gramme dans le fer, soit 0,46 cm⁻¹ dans le fer de densité massique 7,8 g/cm³

⁴⁹ La **dose**. C'est une mesure de l'énergie déposée par les radiations dans une cible. La **dose équivalente**, notée H_T . 'The quantity $H_{T,R}$ defined as $H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}$, where $D_{T,R}$ is the absorbed dose delivered by radiation type R averaged over a tissue or organ T and w_R is the radiation weighting factor for radiation type R'.

⁵⁰ La **dose collective** est la somme des **doses individuelles**, sur une cohorte de nombre arbitraire de personnes.

La dose effective E est la somme de toutes les doses équivalentes des tissus, chacune étant multipliée par le facteur de poids de chaque tissu. $E = \sum w_T \cdot H_T$ où H_T est la **dose équivalente** dans le tissu T et w_T est le facteur de poids pour le tissu T. De la définition de la dose équivalente, il s'en suit que $E = \sum w_T \cdot \sum w_R \cdot D_{T,R}$ où w_R est le facteur de poids pour la radiation R et $w_{T,R}$ est la dose absorbée moyenne dans le tissu ou l'organe R (voir pages 104-105 de [136]).

pour des γ de 1 MeV⁵¹, donc une distance d'atténuation de 2,15 cm, soit environ 10 distances d'atténuation à travers les 22 cm de la cuve) fait que la densité de flux gamma, quand on va de la surface interne à la surface externe, varie considérablement ($2 \cdot 10^4$). Pour les neutrons, l'atténuation s'accompagne d'une diminution d'énergie cinétique⁵². Les captures de ces neutrons conduisent à la formation de radionucléides, eux-mêmes émetteurs de rayons bêta et de rayons gamma. Tout compte fait, l'atténuation à travers la cuve des divers rayonnements gamma est de quelques 10^4 , et de 40 pour les neutrons, ce qui nécessite de classer les matériaux de la cuve irradiée comme des déchets radioactifs (voir [92]).

Les déchets de déconstruction de la cuve sont donc en quantité infime du point de vue des densités de noyaux radioactifs, mais importants par leur radioactivité. Leur agitation thermique est d'une énergie de 1/40 eV. Mais l'énergie d'émission du rayonnement est de l'ordre 10^6 eV. Il sera difficile de les saisir pour les trier. Mais on pourra facilement les repérer par leurs émissions.

Les structures de **béton** qui entourent la cuve et le circuit primaire sont également hétérogènes.

Ces émissions de radioactivités par unité de masse des **matériaux de l'îlot nucléaire** ou de volume sont inférieures au $10\,000^{\text{e}}$ des radioactivités par unité de masse ou de volume rencontrées pour le **cycle de combustible**. Faut-il les traiter ensemble ou bien séparer leurs processus de conditionnement, d'entreposage et de stockage définitif ?

Encadré 9 – Diluer, rassembler, concentrer

Peut-on comparer la radioactivité issue du démantèlement d'un réacteur nucléaire et celle du cycle de combustible ?

⁵¹ Les rayons gamma du cœur sont la somme de : (i) des gammas prompts émis lors des fissions, (ii) des gammas émis par les produits de fission, (iii) des gammas émis lors des captures de neutrons par les divers matériaux traversés par les neutrons, (iv) des gammas issus lors de la diffusion inélastique des neutrons rapides par les noyaux des matériaux traversés.

⁵² La section efficace dite de « *removal cross section* » des neutrons dans le fer est d'environ 2 bars, soit pour la section macroscopique $\Sigma = 0,168 \text{ cm}^{-1}$, soit une longueur d'atténuation d'environ 6 cm dans le fer, soit une atténuation de 40 à travers l'épaisseur de la cuve. Le flux de neutrons étant d'environ 10^{14} neutrons/cm²-secondes, le flux de neutrons à la face externe est d'environ 10^{12} neutrons/cm²-seconde, ce qui nécessite une protection supplémentaire. Protéger la cuve des neutrons issus du cœur est donc une fonction majeure pour faciliter le démantèlement.

La radioactivité à laquelle on sera confronté pendant le démantèlement sera celle des matériaux de structures, éventuellement de contrôle-commande, de chargement/déchargement et de fonctions thermodynamiques à l'intérieur de la cuve et du couvercle, et celle éventuellement transportée dans le circuit primaire. Cette radioactivité a été créée par les captures de neutrons, tant des intérieurs de cuve, de couvercle, que par les absorptions des rayons gamma. La concentration de ces noyaux dans ces matériaux résulte des fuites des neutrons hors du cœur, soit environ 2 % des neutrons issus de fission (voir documents 122, page 294 et 123, page 295 de [2]).

Au contraire, le nombre de produits de fission, donc facteurs de radioactivité, est d'environ 40 % par neutron issu de fission. De plus, ces produits de fission radioactifs restent confinés, concentrés, dans le crayon combustible, à l'intérieur de la gaine.

Les fuites de neutrons hors du cœur traversent tous les matériaux, irradiant la quasi-totalité des matériaux du volume (environ 200 m³) intérieur de la cuve, ainsi qu'une faible épaisseur de celle-ci. Ces noyaux radioactifs sont donc très dilués en concentration volumique, comparés à ceux contenus dans les crayons. Cela explique la faible quantité de déchets de haute activité engendrée par le démantèlement d'un réacteur. Les déchets seront surtout de moyenne et de faible radioactivité.

Une règle fondamentale est d'interdire toute dilution et tout mélange des substances radioactives.

6.3. Traduction réglementaire des effets biologiques sur le vivant

Cela a-t-il un sens physique de séparer les déchets de démantèlement radioactifs de ceux qui ne le seraient pas ? Peut-on donner un autre sens en prenant en compte les lésions biologiques sur le vivant ?

Les opérations sur un site de démantèlement nécessitent de déterminer ce qui est radioactif et ce qui ne l'est pas. Pour ce faire, des études de radioprotection ont été poursuivies depuis plusieurs décennies. Elles ont abouti à des réglementations internationales exposées dans les références [118], [119], qui reposent sur les bases de radioprotection exposées dans [80], [102], [123]. Une réflexion sur ce sujet figure dans la référence [124]. Elles conduisent à définir les notions d'exclusion, d'exemption et de *clearance* (voir [137] et [138], et plus récemment, dans le cadre de l'IAEA : [141-146]).

Un exemple de critère de seuil relatif à une masse de déchets radioactifs : ont été définies :

- une dose maximale par unité de durée de l'exposition, donc en sievert pour une quantité donnée et pour un individu. Le critère de base est qu'il ne soit plus nécessaire, en dessous de ce seuil, de contrôler la dose reçue par l'individu d'une population donnée. Cette garantie a été de choisir un niveau de dose effective de 10 microsievert par année ;
- une dose collective pour un groupe donné d'individus, si petite qu'elle ne requiert pas de contrôle. La traduction numérique en est que la dose potentielle effective collective reçue pendant un an n'excède pas 1 individu-sievert.

Encadré 10 – Classifications des déchets radioactifs selon le nombre de désintégrations par unité de masse

Puisque certaines des classifications des déchets radioactifs sont définies par un nombre de désintégrations par unité de masse, on pourrait, en diluant ces substances, diminuer autant qu'on le veut. Cette disposition est interdite par les règlements internationaux. Ainsi, pour la Suède⁵³, les catégories sont :

- *non contaminated* ;
- *very low low* : 0-1 becquerel/gramme, 16 000 tonnes de métal et 170 000 tonnes de béton pour un réacteur à eau bouillante de Suède [115] ;
- *low low* : 1-20 becquerels/gramme ;
- *low medium* : 20-100 becquerels/gramme ;
- *low high* : 100-1 000 becquerels/gramme ;
- *high* > 1 000 becquerels/gramme.

6.4. Intervention en milieu hostile

Les interventions en milieu hostile sont de natures très variées. Elles consistent à : découper, séparer, trier, enlever, déplacer, décontaminer, réhabiliter les sols et les sous-sols, entreposer sur chantier, fabriquer des colis.

⁵³ Les activités de démantèlement de la Suède sont étudiées, ainsi que pour toutes les nations nucléaires de l'OCDE, par la Nuclear Energy Agency, NEA/OCDE (voir [22-25]).

- Le traitement de fragments de **combustibles irradiés**, leur tri et, éventuellement, leur rassemblement et la fabrication de colis radioactifs les contenant, plus ou moins pris dans des matrices assurant leur isolement et leur encapsulation, ne sont à considérer ici que si le réacteur en cours de démantèlement a subi *un accident concernant son cœur*. Cela peut concerner des combustibles sous forme d'oxyde pour les REP ou sous forme métallique pour les UNGG ou bien les réacteurs de recherche ou les réacteurs de propulsion. Dans de tels cas, il faut prévoir une ou des durées de refroidissement de ces corps radioactifs avant leur isolement dans un colis, et donc mettre au point les équipements pour les **refroidir** [34] et prévoir les modalités de leur entreposage sur le site jusqu'à un refroidissement suffisant pour que ces déchets soient transportables (voir [70]).
- Une des clés nécessaires pour transformer l'assemblage de volume optimal qu'est un réacteur nucléaire de puissance en un ensemble de fragments susceptibles de tri et de manutention, avec l'assurance d'une radioprotection efficace pour le personnel du site, est la mise au point :
 - i. de **processus de découpage** adéquats [45] (en particulier pour les fortes épaisseurs telles que celles de la cuve), avec procédé au laser [35] ;
 - ii. de **techniques de manutention** adaptées aux opérations en milieu radioactif, à chaud et pour des matériaux hétérogènes ;
 - iii. de **transport** sur le chantier, sur le site ;
 - iv. et de possibilité **d'évacuation** hors du site grâce à l'existence de lieux **d'entreposage** adaptés à l'accueil de ces déchets radioactifs.
- Les techniques de « **remédiation** » **des sols** (voir [49], [81]), leur assainissement vis-à-vis de la présence de matériaux radioactifs, sont un des sujets de ce séminaire.
- Il sera crucial d'assurer une **traçabilité** des matériaux, des objets, des dispositifs de mesure, de l'instrumentation utilisée, du sens des échantillons. C'est dire l'importance des techniques de **triage**. La caractérisation des isotopes peut être utilisée avec l'instrumentation spécialisée des laboratoires⁵⁴.
- Les procédés de **séparation** : les matériaux solides et les effluents devront pouvoir être traités sur le site par des procédés chimiques [42]

⁵⁴ Par exemple, caractériser les isotopes des actinides à l'Institut des transuraniens (ITU) de l'Union européenne à Karlsruhe.

et physicochimiques menant à des dissolutions, à des précipitations, des filtrations, des adsorptions, etc.

- L'instrument privilégié de l'action sur le site sera l'obtention de mesures par des prélèvements d'**échantillons** au moyen d'analyses non destructives quand cela est possible.
- Parmi les traitements des déchets et effluents issus des travaux de démantèlement, soulignons le cas des ciments, bétons, des corps pulvérulents producteurs d'aérosols, des liquides organiques, des liquides organo-halogènes, etc.
- Le fonctionnement d'un tel chantier de démantèlement nécessite tant un (ou des) **entrepôts(s)** sur le site du chantier que un ou des entrepôts(s) extérieur(s) au site de démantèlement, et donc les moyens de manutention, de transport et d'exploitation de ces entrepôts. Pour ce faire, il faut estimer les volumes, les masses, les radioactivités, les demi-vies, les flux massiques, les puissances thermiques à évacuer et la durée de ces entrepôts.
- La conception, la fabrication, le remplissage, la fermeture définitive, la surveillance de la thermique et de la radioactivité, la traçabilité, et bien entendu l'étanchéité des conteneurs de ces colis sont des tâches prioritaires. Il faut aller vers des colis ressemblant aux *containers* des transports maritimes, avec un nombre de catégories à géométrie extérieure aussi réduit que possible. Leurs normes doivent être compatibles entre fabricants et exploitants, non seulement dans un pays, mais aussi aux échelles européenne et mondiale. Ceci permet des constructions en série et des types d'équipements de manutention moins nombreux et compatibles entre eux et toutes fonctions envisagées à l'échelle internationale⁵⁵. Comme indiqué ci-dessus, une caractéristique essentielle d'une catégorie de colis, avec sa radioactivité⁵⁶, est la puissance thermique qu'elle dégage. Ainsi, les colis CSD-V⁵⁷, qui sont les plus radioactifs, ont, à la fin de leur fabrication, une puissance thermique d'environ 2 000 watts. Après une durée de 50 ans,

⁵⁵ Un exemple d'une telle normalisation est celui des porte-conteneurs des transports maritimes.

⁵⁶ « Le contenu moyen d'un colis de moyenne radioactivité ou de haute radioactivité est, pour 1 m³ de colis, 2,35 tonnes de verres nucléaires, 0,46 tonne d'acier inox, 3,1 tonnes de coques et embouts compactés et 0,9 tonne d'acier inoxydable, 0,5 tonne de coques et embouts enrobés dans 1,5 tonne de ciment et 0,35 tonne d'acier. » (voir les encadrés 5 et 6 de [71]).

⁵⁷ CSD-V : Colis standard de déchets vitrifiés. L'entrepôt qui les contient, placé au centre de retraitement de La Hague, a une capacité d'accueil de 4 320 colis. Les ateliers de vitrification dit R7 et T7 peuvent accueillir 12 420 colis. Cet entrepôt est formé de 2 modules de 180 puits, chaque puits pouvant accueillir et refroidir 12 colis. Les détails de ces entrepôts sont tirés de [69]. Ces colis contiennent les produits de fission et les actinides mineurs des 25 000 tonnes de combustible usés retraités depuis la mise en fonctionnement de l'usine d'Areva La Hague, en 1966.

cette puissance est d'environ 600 watts. Au bout de 1 000 ans, la puissance thermique est tombée à environ 2 watts. Pour les colis de matériaux de structure tels que les embouts et les coques d'élément combustible, la puissance thermique est d'un facteur 100 fois plus petit (28 watts⁵⁸ à la fin de la fabrication et après 25 ans, 2,4 watts par colis. Un seul de ces colis pèse environ 3 500 kg [68]).

Soulignons que la **sûreté** des colis est assurée par les **conteneurs** et les procédés **d'encapsulation des couvercles**. C'est un sujet nécessitant des garanties expérimentales robustes.

- **Les robots**⁵⁹ pour intervenir à la place des hommes en milieu contaminé. Bras télé-opéré, imagerie gamma et alpha, spectrométrie gamma. La possibilité pour ces robots de se situer dans l'installation nucléaire en fin de vie, de s'y déplacer et d'y agir utilement.
- **Le calcul scientifique** décrivant complètement les activités de démantèlement sur le site et variant avec le temps engendre entre autres des chantiers virtuels. Ceux-ci permettent de comparer les diverses options pour les neuf points scientifiques et techniques cités ci-dessus.

6.5. Procédés scientifiques et techniques de décontamination des structures et des sols [66]

Dans le cas de contamination chimique, le sujet a été étudié par l'Académie des sciences (voir [108] et [109]). Un exemple de variation de la radioactivité (en becquerels par kilogramme de tel et tel sol) en fonction de la profondeur est donné en page 39, figure 4 de [66].

6.6. Traitement des déchets et effluents [41] du démantèlement

Nous avons vu ci-dessus que les chantiers de démantèlements produisent toutes sortes de déchets radioactifs dans des conditions diverses et

⁵⁸ La radioactivité d'un tel colis est d'environ 60 curies.

⁵⁹ Diverses catégories de robots ont été réalisées par les industriels (voir [86, 87, 90, 95]), tels que SUSI (SUBmarine System for Inspection, équipé de vision par lumière et ultrasons), qui peut être manœuvré dans tout le circuit primaire d'un réacteur à eau, y compris quand il contient de l'eau.

contraignantes. Quelles sont les options de stratégies scientifiques loïsibles pour minimiser leurs détriments tout au court de la durée de leur radioactivité ?

Un exemple en est le cas du **graphite irradié** : (i) des UNGG en France (23 000 tonnes actuellement répartis pour entreposage sur les sites où ils ont été produits), (ii) des Magnox et des AGR au Royaume-Uni (81 000 tonnes), (iii) des RBMK en Russie (50 000 tonnes), (iv) des HTR, etc.

La radioactivité de ces graphites irradiés provient des captures de neutrons par les traces de l'isotope naturel du chlore conduisant au **chlore 36**, de demi-vie (β - 98,1 %, inférieur à 0,7 MeV) $3,00 \cdot 10^5$ ans. Un autre isotope radioactif présent dans ces graphites irradiés est le **carbone 14** (formé par des captures successives de neutrons sur l'isotope naturel 12 du carbone) de demi-vie (β - 0,15 MeV) 5 730 ans. Enfin, du **tritium**, de demi-vie β : 12,323 ans peut s'y former.

La fluence de neutrons reçue par ces graphites est d'environ 10^{21} à 10^{22} neutrons/cm². L'inventaire mondial des masses de graphite irradié est d'environ **230 000 tonnes** réparties en 125 réacteurs nucléaires de puissance arrêtés.

Pour traiter ces grandes masses de graphite irradié, classés comme déchets de moyenne activité à vie longue, trois options sont envisagées dans le monde :

- traitement thermique et destruction ;
- stockage souterrain tel quel. Le choix de la NDA (Royaume-Uni) ;
- tri, puis traitement et stockage des résidus des traitements [58].

7 | Les hommes

7.1. Radioprotection

Voir [34, 44, 47, 48, 51, 52, 56, 65, 80, 102-105].

Pendant le chantier de démantèlement, soit plusieurs décennies, des **rejets d'effluents gazeux ou liquides pourraient se produire**⁶⁰ sur le site

⁶⁰ Les rejets actuellement autorisés et ceux effectivement réalisés sont précisés dans les pages 193, 194 et 195 de [73], pour **les liquides** (tritium, le carbone 14, les iodes et autres) et **les gaz** (en ajoutant à la liste précédente, les gaz rares). L'ordre de grandeur pour un site se compte en dizaines de curies (par exemple, le tableau L.7.2.1.2., page 193 de [73] pour l'année 2010).

et vers l'extérieur du site. Sur quels critères de santé publique et de santé des travailleurs les pouvoirs publics s'appuieront-ils pour décider du traitement à leur donner ? Comment seront-ils comparés avec les rejets maximaux autorisés pendant l'exploitation nominale de la centrale électrique, qu'il s'agisse :

- des critères de radioprotection pour les travailleurs sur le site du démantèlement ;
- des critères de radioprotection pour qu'après le démantèlement, toute personne, travaillant, habitant, ou utilisant le site décontaminé ne soit exposée à aucun danger ;
- des normes d'exposition aux radiations des travailleurs éventuels sur le site, du public, qui forment les critères de base des réglementations et consignes pour toutes les personnes présentes et futures sur le site et sur son voisinage (voir [75]).

Ces distinctions ne sont pas anodines dans les processus de décision du démantèlement⁶¹ : le démantèlement immédiat met en avant la sécurité du citoyen, alors que le démantèlement différé, de toute évidence, minimise le taux d'exposition du public.

Par exemple, pour que le démantèlement soit considéré comme terminé et satisfaisant, la NRC⁶² des États-Unis fixe un critère exprimé non pas en radioactivité, mais en effet biologique sur le corps humain, ce qui suppose un scénario d'irradiation directe, ou/et d'ingestion, ou/et d'inhalation [54, 79, 80, 93, 97, 102, 103]. Cette dose est de 0,25 millisievert par an (*'with institutional controls in place and 1 millisievert/year or 5 millisievert/year with no institutional controls [51]'*) de **dose totale effective équivalente** pour un groupe de personnes censé représenter un échantillon de population le plus exposé et pour cela dit « critique ».

Encadré 11 – Contrôler les phénomènes vecteurs susceptibles de disperser de la radioactivité sur un chantier de démantèlement

1. À la suite de la crise concernant les événements de la centrale de Fukushima Daiichi, on peut se demander si les préoccupations sur l'emploi présent et futur de l'énergie électronucléaire, dont le

⁶¹ L'ensemble des mesures de sûreté, de sécurité, de radioprotection fait l'objet des études d'agences publiques nationales et internationales d'expertise. En France, ces compétences et ces expertises sont réalisées par l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) (voir [54, 55, 62, 79, 134]). La chimie, la physicochimie, la biologie (voir [72]) y jouent un rôle important, outre évidemment la physique (voir [31], [75], [111], [112]). Les décisions sont prises par l'ASN (voir [90]).

⁶² NRC : Nuclear Regulatory Commission, États-Unis (voir [3-16]).

démantèlement, sont justifiées. L'une d'elles est inéluctable, c'est que toute centrale électronucléaire (avec les installations associées du cycle de combustible) en cours de **démantèlement** ne devrait impliquer, où qu'elle soit située dans le monde, que des personnels expérimentés, prêts à intervenir à tout moment, avec les infrastructures adéquates, en cas d'événements naturels (inondations, sécheresse, tempêtes de neige, vagues de chaleur, séisme, tsunami, éruption volcanique, etc.) ou de bouleversements politiques ou belliqueux (y compris terroristes). **Une telle surveillance, dont celle du démantèlement, devrait être maintenue pendant une durée de trois à quatre décennies après tout arrêt définitif de la centrale électro-nucléaire considérée.**

2. Devrait-on également fixer des **critères de sécurité** des installations nucléaires en cours de **démantèlement** dans tous les lieux concernés, tels que **les conséquences d'un dysfonctionnement de ces chantiers de démantèlement** (effets sur les hommes, les écosystèmes, les surfaces des terres et les mers touchées, les eaux de surface et de profondeur) puissent toujours être **contrôlées** (bornées, limitées, circonscrites, restreintes) en grandeur et en durée, **ces bornes étant internationales** puisque les nuages, les eaux contaminées⁶³, les aérosols, etc., ne sont pas arrêtés aux frontières ? Sur le plan scientifique, cela voudrait-il dire maîtriser pendant le démantèlement⁶⁴ le devenir des substances radioactives, en particulier, les composés volatils⁶⁵ ou/et gazeux, les corps dissous dans les eaux, l'évacuation des déchets radioactifs du chantier et des éventuels composants du cycle de combustible local encore liés au site⁶⁶ afin de diminuer le nombre de dépôts de substances radioactives et de contribuer à mieux les surveiller ? Cela est-il possible sur le plan scientifique ? Quels seraient les verrous physiques, chimiques, de matériaux, etc. ? Peut-on aboutir à un cahier des charges, à un programme expérimental d'exploration ? (Voir [38].)

⁶³ L'importance de borner les flux d'eau contaminée et leur stock concerne le chantier, le refroidissement des corps radioactifs, le nettoyage, les filtrats, les sols et sous-sols, les pluies, vents, humidité, neige, distribution de fluides, etc. Les événements correspondant sur le chantier de Fukushima l'ont montré [34].

⁶⁴ Les documents 53 à 63 des pages 240-250 de [2] montrent que la radioactivité, et donc, à des constantes près, la puissance résiduelle des produits de fission, l'emporte sur celle des actinides pendant plusieurs centaines d'années.

⁶⁵ Parmi les produits de fission ayant des composés volatils aux températures atteintes localement sous l'irradiation de ces produits de fission, citons : l'iode, le césium, le tellure, le sélénium, l'antimoine [78].

⁶⁶ Cette situation pourrait être due à un incident ou bien, comme actuellement à Fukushima, à un accident.

7.2. Instrumentation de la dosimétrie

Voir [93, 96, 97].

Un grand nombre de personnes va devoir travailler sur ces sites de démantèlement où des surprises peuvent advenir dans les déchets obtenus et vérifiés. Les normes d'expositions aux radiations du public et des futurs travailleurs sur le site forment les critères de base des réglementations. Encore faut-il que ces travailleurs soient munis d'instruments de mesure de la radioactivité, donc de dosimètres (voir *Appendix 10* de [102] : *neutron and gamma dosimetry for the dose-effect relationship used by the ICPR*).

7.3. Quels risques ?

Il nous faut souligner les différences entre les risques d'accident sur un chantier de démantèlement et les risques liés à un accident sur un réacteur de puissance en fonctionnement, ou arrêté, avec son combustible usé dans le réacteur.

Dans un réacteur en fonctionnement, les risques principaux sont liés aux possibilités suivantes :

1. Des **réactions en chaîne de fission** peuvent se produire, engendrant des **actinides** (voir encadré 5) (comme Pu 239 demi-vie 24 110 ans, Pu 240 demi-vie 6 563 ans, Pu 241 demi-vie 14,35 ans, Am 241 demi-vie 432 ans, Cm 242 et Cm 244, émettant des neutrons par fission spontanée, difficile à arrêter) et des **produits de fission** dont certains sont particulièrement dangereux pour la santé (comme l'iode 131 demi-vie 8,02 jours et l'iode 129 demi-vie $1,57 \cdot 10^7$ ans, etc., voir l'encadré 5). Aucun de ces noyaux n'est présent dans « l'îlot nucléaire » d'un chantier de démantèlement, ce qui implique que les éléments combustibles usés sont soit évacués du site, soit d'une éventuelle piscine intérieure à l'enceinte de confinement.
2. Dans un réacteur en service, les dégagements de chaleur dus aux fissions (ou même seulement aux désintégrations α , β , γ et de neutrons), sont soit mélangés dans les éléments combustibles, soit en contact proche. Le ralentissement de ces rayonnements crée une **puissance thermique** de durée substantielle qui peut engendrer des changements de phase, des réactions chimiques, donc amplifier considérablement tout incident.

C'est de la conjonction des effets 1 et 2 que résulte le risque d'**accident nucléaire** pour un réacteur en fonctionnement, ou arrêté et contenant ses éléments combustibles dans le cœur.

Ce n'est pas le cas sur un chantier de démantèlement.

Ce qui est commun à ces deux activités industrielles nucléaires, c'est la population de radionucléides dans les matériaux de structures (voir l'encadré 4). Celle-ci est de l'ordre du millième de la radioactivité décrite en 1, ci-dessus (actinides et produits de fission). De plus, les demi-vies de ces radionucléides vont de quelques années à une centaine d'années. L'obstacle de devoir stocker des déchets nucléaires pendant des durées allant jusqu'à quelques centaines de milliers d'années est écarté.

Les risques des travaux de chantier classiques demeurent dans les deux cas, y compris les risques chimiques (incendies, soudures, températures), de manutentions, électriques, mécaniques, chutes.

Conclusion

Il y a une **contradiction intrinsèque** entre les deux objectifs majeurs du démantèlement des centrales électronucléaires :

- **concentrer la radioactivité**⁶⁷ des déchets radioactifs pour faciliter les manutentions, déplacements, transports, entreposages, et/ou,
- **diluer la radioactivité** pour mieux la manipuler et diminuer son activité par colis afin de mieux confiner.

Il faut donc rechercher un compromis optimal valable pendant le chantier, pendant les entreposages et pendant le stockage « définitif ».

Il faudra distinguer et choisir une **installation radioactive modèle sur laquelle une opération initiale de démantèlement** aussi complète que possible serait accomplie, pour servir de voie d'expérimentation, les calendriers des autres installations déjà en cours de démantèlement étant convenablement décalés. Ceci a été effectué tant au Royaume-Uni (sur la centrale de Berkeley) qu'aux États-Unis (sur la centrale de Maine Yankee).

L'activité de démantèlement des installations nucléaires radioactives se poursuit dans une grande partie des nations industrielles. La liste mondiale de ces installations en cours de démantèlement est donnée en annexe de ce chapitre. Une expérience considérable s'accumule dans les laboratoires, chez les producteurs d'électricité, les industriels, les universités, les organismes de santé, d'environnement, etc., des nations concernées et des organismes internationaux de coopération scientifique et technique [57].

⁶⁷ Par exemple par évaporateur ou calcination.

Afin de **partager l'accès aux informations scientifiques** et techniques utiles, l'IAEA a fondé en 2007, suite à une conférence à Athens⁶⁸ en 2006, un **International Decommissioning Network** (IDN, voir [36]) qui rassemble cette expérience⁶⁹ et la rend accessible [27]. Faut-il faire un point analogue sur le plan de l'Union européenne, comme cela a été le cas avec le programme PAGES de stockage des déchets radioactifs ? Les démantèlements de la centaine de réacteurs de puissance de l'Union européenne⁷⁰, qui s'étaleront sur le siècle, le nécessiteront.

Les organismes français concernés par le démantèlement des installations nucléaires ont depuis longtemps travaillé sur les sites dont le fonctionnement est arrêté et, pour ce faire, dans le cadre normal des relations scientifiques et techniques, lié des échanges de vues, notamment durant les grandes conférences scientifiques. Effectuer en temps utile un important programme de recherche scientifique et technique devrait permettre de démanteler les centrales électronucléaires de type REP sans obstacle dirimant (voir [114, 116, 133]). Il faut néanmoins être attentif pour les autres filières au traitement du graphite irradié, du sodium et du tritium.

⁶⁸ La ville américaine de Athens est située dans le Tennessee, près du Oak Ridge National Laboratory.

⁶⁹ La mission de l'IDN (International Decommissioning Network) est écrite dans [27] : *'to raise skills and expert levels that will facilitate safe decommissioning of reactor facilities, through collaboration, training and sharing of knowledge and information among member state organizations'*.

⁷⁰ Le nombre des réacteurs de puissance de l'Union européenne qui sont soit arrêtés, soit en cours de démantèlement, **soit planifiés pour être démantelés**, est de : France (12) + Royaume-Uni (29) + Belgique (1) + Hollande (1) + Espagne (2) + Italie (4) + Allemagne (27) + Suisse (1) + Suède (3) + Slovaquie (3) + Bulgarie (4) + Lituanie (2), soit en tout 89. Il existe encore 131 réacteurs de puissance en 2013, dont la capacité est de 120 GW, d'un âge moyen d'environ 29 ans.

À titre de comparaison, mentionnons qu'il existe actuellement environ 104 réacteurs électronucléaires aux **États-Unis** (page 44 de [83]), d'âge moyen de 33,4 ans. Ils ont une capacité globale de 101 GWe, produisent environ 770 térawatts par an. L'âge moyen est plus élevé qu'en UE car : (i) il n'a pas été construit de nouveau réacteur depuis l'accident de Three Mile Island en 1979 et aussi (ii) parce que la NRC a accordé aux compagnies d'électricité la permission de prolonger leur exploitation de réacteurs d'abord à 40 ans puis maintenant à 60 ans. 72 de ces réacteurs ont reçu la permission d'augmenter à 60 ans leur durée de vie. 18 demandes sont encore en cours d'examen par la NRC. 31 réacteurs ont été arrêtés et sont en cours de démantèlement. La situation des centrales électronucléaires aux États-Unis est donc analogue à celle en UE (il y a 153 réacteurs de puissance arrêtés dans le monde, dont 31 aux États-Unis, à la mi-2013 : voir [5, 10, 13]).

ANNEXE 1

Liste mondiale⁷¹ des réacteurs nucléaires de puissance⁷² arrêtés ou en cours d'arrêt à ce jour, avec leurs caractéristiques

La phase actuelle du démantèlement est donnée par le code chiffré suivant par l'agence internationale IAEA : '– **1**: *Drawing up the final decommissioning plan*; – **2**: *Reactor core defueling*; – **3**: *Waste conditioning on site (only for decommissioning waste)*; – **4**: *Waste shipment off site (only for decommissioning waste)*; – **5**: *Safe enclosure preparation*; – **6**: *Partial dismantling*; – **7**: *Active safe enclosure period*; – **8**: *Passive safe enclosure period*; – **9**: *Final dismantling*; – **10**: *Final survey*; – **11**: *Licence terminated (legal act at the end of the decommissioning)*'.

Arménie

- **Armenian-1**, puissance électrique **376 MWe**, date de démarrage **1976**, arrêté en 1989. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.

Belgique

- **BR-3**, puissance électrique **10 MWe**, date de démarrage **1962**, arrêté en **1987**. Phase actuelle du démantèlement : 4, 9.

Bulgarie

- **Kozloduy-1**, puissance électrique **408 MWe**, date de démarrage **1973**, arrêté en 2002. Phase actuelle du démantèlement : 6.
- **Kozloduy-2**, puissance électrique **408 MWe**, date de démarrage **1975**, arrêté en 2002. Phase actuelle du démantèlement : 6.
- **Kozloduy-3**, puissance électrique **408 MWe**, date de démarrage **1980**, arrêté en 2006. Phase actuelle du démantèlement : 7.

⁷¹ Cette liste n'est pas homogène car nous ne disposons pas de tous les types de réacteurs et de toutes leurs puissances électriques. Sauf indication contraire, nous suivons dans cette liste les publications de l'IAEA [17-20, 118]. Pour les pays de l'OCDE, nous utilisons également les publications de la NEA/OCDE [22-25, 27, 57, 117].

⁷² Ces nombres sont relatifs au 31 décembre 2013 (voir Nuclear Power Reactors in the World 2014). Cette liste n'est pas homogène car nous ne disposons pas de tous les types de réacteurs et toutes leurs puissance électriques (voir [26, 62, 53, 82, 83, 125, 133]).

- **Kozloduy-4**, puissance électrique **408 MWe**, date de démarrage **1982**, arrêté en 2006. Phase actuelle du démantèlement : 7.

Canada

- **Rolphon**, puissance électrique **22 MWe**, date de démarrage **1962**, arrêté en **1987**. Phase actuelle du démantèlement : 8.
- **Douglas Point**, puissance électrique **206 MWe**, date de démarrage **1967**, arrêté en **1984**. Phase actuelle du démantèlement : 8.
- **Gentilly-1**, puissance électrique **250 MWe**, date de démarrage **1971**, arrêté en **1977**. Phase actuelle du démantèlement : 8. Ce réacteur de type CANDU/BWR a fonctionné 180 jours.
- **Gentilly-2**, puissance électrique **635 MWe**, date de démarrage 1982, arrêté en 2012.

France^{73 74}

- **Phenix**, puissance électrique **130 MWe**, date de démarrage **1973**, arrêté en **2010**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.⁷⁵
- **Superphenix**, date de démarrage **1986**, arrêté en **1998**. Phase actuelle du démantèlement : 9.
- **Chinon A1**, date de démarrage **1963**, arrêté en **1973**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Chinon A2**, date de démarrage **1965**, arrêté en **1985**. Phase actuelle du démantèlement : 6.
- **Chinon A3**, date de démarrage **1966**, arrêté en **1990**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Chooz A**, date de démarrage **1967**, arrêté en **1991**. Phase actuelle du démantèlement : 4, 9.
- **EL4**, Monts d'Arrée, Brennilis, date de démarrage **1967**, arrêté en **1985**. Phase actuelle du démantèlement : 9. Le chantier doit évacuer

⁷³ Nous comprenons dans cette liste les réacteurs qui ont été reliés au réseau électrique de la France, et donc, notamment, les réacteurs G1, G2, G3.

⁷⁴ Nous utilisons pour les réacteurs de puissance de la France, les publications de EDF [58], du CEA [93], de l'Andra [68, 88, 98-101, 126-129], de l'IRSN [55, 134], d'Areva [70].

⁷⁵ Voir un document important sur le retour d'expérience de ce réacteur : [43].

les déchets de moyenne activité à vie longue, mais il n'existe aujourd'hui pour ceux-ci, ni entreposage, ni stockage.

- **Saint-Laurent A1**, date de démarrage **1969**, arrêté en **1990**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Saint-Laurent A2**, date de démarrage **1971**, arrêté en **1992**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Bugey 1**, date de démarrage **1972**, arrêté en **1994**. Phase actuelle du démantèlement : 9.
- **Marcoule G1**, date de démarrage **1956**, arrêté en **1968**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Marcoule G2**, date de démarrage **1959**, arrêté en **1980**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Marcoule G3**, date de démarrage **1960**, arrêté en **1984**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.

Allemagne⁷⁶

- **Stade**, date de démarrage **1972**, arrêté en **2003**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 4.
- **Gundremmingen A**, date de démarrage **1967**, arrêté en **1977**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **AVR Juelich**, date de démarrage **1967**, arrêté en **1988**. Phase actuelle du démantèlement : 9.
- **Reinsberg**, date de démarrage **1966**, arrêté en **1990**. Phase actuelle du démantèlement : 9.
- **Greifswald-1**, date de démarrage **1973**, arrêté en **1990**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Greifswald-2**, date de démarrage **1974**, arrêté en **1990**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Greifswald-3**, date de démarrage **1977**, arrêté en **1990**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Greifswald-4**, date de démarrage **1979**, arrêté en **1990**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.

⁷⁶ 17 réacteurs en fonctionnement le 01/01/2011 (voir [116, 130, 131]).

- **Greifswald-5**, date de démarrage **1989**, arrêté en **1989**. Phase actuelle du démantèlement : 1, 3, 9.
- **Lingen**, date de démarrage **1968**, arrêté en **1977**. Phase actuelle du démantèlement : 8.
- **Wuergrass**, date de démarrage **1971**, arrêté en **1994**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 4, 6.
- **Vak Kahl**, date de démarrage **1961**, arrêté en **1985**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Niederaichbach**, date de démarrage **1973**, arrêté en **1974**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Unterweser**, date de démarrage **1978**, arrêté en **2011**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **THTR-300**, date de démarrage **1985**, arrêté en **1988**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **MZFR**, date de démarrage **1966**, arrêté en **1984**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Muelheim-Kaerlich**, date de démarrage **1986**, arrêté en **1988**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Groszweilheim**, date de démarrage **1969**, arrêté en **1971**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **KNK II**, date de démarrage **1978**, arrêté en **1991**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.

Le calendrier de fermeture de toutes les centrales nucléaires d'Allemagne est :

- **Biblis A**, puissance électrique **1 167 MWe**, date de démarrage **1974**, date d'arrêt **2011**.
- **Biblis B**, puissance électrique **1 240 MWe**, date de démarrage **1976**, date d'arrêt **2011**.
- **Brokdorf**, puissance électrique **1 410 MWe**, date de démarrage **1986**, date d'arrêt programmée **31/12/2019**.
- **Brunsbüttel**, puissance électrique **771 MWe**, date de démarrage **1976**, date d'arrêt **2011**.
- **Emsland**, puissance électrique, **1 329 MWe**, date de démarrage **1988**, date d'arrêt programmée **31/12/2022**.

- **Grafenrheinsfeld**, puissance électrique **1 275 MWe**, date de démarrage 1981, date d'arrêt programmée **31/12/2015**.
- **Grohnde**, puissance électrique **1 360 MWe**, date de démarrage **1984**, date d'arrêt programmée **31/12/2021**.
- **Gundremingen B et C**, puissance électrique **1 284 MWe**, date de démarrage **1984**, dates d'arrêt programmées B : **31/12/2017** et C : **31/12/2021**.
- **Isar 1**, puissance électrique 878 MWe, date de démarrage **1977**, date d'arrêt **2011**.
- **Isar 2**, puissance électrique **1 410 MWe**, date de démarrage **1988**, date d'arrêt programmée non connue.
- **Krummel**, puissance électrique **1 346 MWe**, date de démarrage **1983**, date d'arrêt **2011**.
- **Neckarwestheim 1**, puissance électrique **785 MWe**, date de démarrage **1976**, date d'arrêt **2011**.
- **Neckarwestheim 2**, puissance électrique **1 310 MWe**, date de démarrage **1989**.
- **Obrigheim**, puissance électrique **340 MWe**, date de démarrage **1968**, date d'arrêt **2005**.
- **Philipsburg 1**, puissance électrique **890 MWe**, date de démarrage **1979**, date d'arrêt **2011**.
- **Philipsburg 2**, puissance électrique **1 402 MWe**, date de démarrage **1984**.

Italie

- **Latina**, puissance électrique **153 MWe**, date de démarrage **1963**, arrêté en **1987**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 9.
- **Garigliano**, puissance électrique **150 MWe**, date de démarrage **1964**, arrêté en **1982**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 4, 9.
- **Enrico Fermi**, puissance électrique **260 MWe**, date de démarrage **1964**, arrêté en **1990**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 4, 9, 10.
- **Caorso**, puissance électrique **860 MWe**, date de démarrage **1978**, arrêté en **1990**. Phase actuelle du démantèlement : 4, 9.

Japon

- **PDR**, puissance électrique **12 MWe**, date de démarrage **1963**, arrêté en **1976**. Phase actuelle du démantèlement : 3.
- **Hamaoka 1**, puissance électrique **515 MWe**, date de démarrage **1974**, arrêté en **2009**. Phase actuelle du démantèlement : 1, 6, 7.
- **Tokai 1**, puissance électrique **137 MWe**, date de démarrage **1965**, arrêté en **1998**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 4, 6, 7, 9.
- **Fugen ATR**, date de démarrage **1978**, arrêté en **2003**. Phase actuelle du démantèlement : 1, 5.
- **Hamaoka 2**, puissance électrique **806 MWe**, date de démarrage **1978**, arrêté en **2009**. Phase actuelle du démantèlement : 1, 6, 7.
- **Fukushima Daiichi 1**, puissance électrique **439 MWe**, date de démarrage **1970**, arrêté en **2011**.
- **Fukushima Daiichi 2**, puissance électrique **760 MWe**, date de démarrage **1973**, arrêté en **2011**.
- **Fukushima Daiichi 3**, puissance électrique **760 MWe**, date de démarrage **1974**, arrêté en **2011**.
- **Fukushima Daiichi 4**, puissance électrique **760 MWe**, date de démarrage **1978**, arrêté en **2011**.
- **Fukushima Daiichi 5**, puissance électrique **760 MWe**, date de démarrage **1977**, arrêté en **2011**.
- **Fukushima Daiichi 6**, puissance électrique **1067 MWe**, date de démarrage **1979**, arrêté en **2011**.
- **Monju**, puissance électrique **246 MWe**, date de démarrage **1995**, arrêt à long terme depuis **1995**.

Kazakhstan

- **Aktau**, puissance électrique **52 MWe**, date de démarrage **1973**, arrêté en **1999**. Phase actuelle du démantèlement : 1, 5, 6.

Lituanie

- **Ignalina 1**, puissance électrique **1 185 MWe**, date de démarrage **1983**, arrêté en **2004**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 1.

- **Ignalina 2**, puissance électrique **1 185 MWe**, date de démarrage **1987**, arrêté en **2009**. Phase actuelle du démantèlement : 2, 3.

Pays-Bas

- **Dodewaard**, puissance électrique **55 MWe**, date de démarrage **1968**, arrêté en **1997**. Phase actuelle du démantèlement : 7.

Russie

- **Obninsk AM1**, puissance électrique **5 MWe**, date de démarrage **1954**, arrêté en **2002**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Beloyarsky-1**, puissance électrique **102 MWe**, date de démarrage **1964**, arrêté en **1983**. Phase actuelle du démantèlement : début du démantèlement 2014.
- **Novovoroney-1**, puissance électrique **197 MWe**, date de démarrage **1964**, arrêté en **1988**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Beloyarsky-2**, puissance électrique **146 MWe**, date de démarrage **1967**, arrêté en **1990**. Phase actuelle du démantèlement : début du démantèlement 2014.
- **Novovoroney-2**, puissance électrique **336 MWe**, date de démarrage **1969**, arrêté en **1990**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Melekess**, puissance électrique **55 MWe**, date de démarrage **1964**, arrêté en **1983**.

Slovaquie

- **Bohunice A1**, Puissance électrique **93 MWe**, date de démarrage **1972**, arrêté en **1977**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 6.
- **Bohunice-1**, puissance électrique **408 MWe**, date de démarrage **1978**, arrêté en **2006**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 4, 9.
- **Bohunice-2**, puissance électrique **408 MWe**, date de démarrage **1980**, arrêté en **2008**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 4, 9.

Ukraine

- **Tchernobyl 1**, puissance électrique **740 MWe**, date de démarrage **1977**, arrêt définitif depuis **1996**.

- **Tchernobyl 2**, puissance électrique **925 MWe**, date de démarrage **1978**, arrêt définitif depuis **1991**.
- **Tchernobyl 3**, puissance électrique **925 MWe**, date de démarrage **1981**, arrêt définitif depuis **2000**.
- **Tchernobyl 4**, puissance électrique **925 MWe**, date de démarrage **1983**, arrêt définitif depuis **1986**.

Espagne

- **Jose Cabrera 1**, puissance électrique **141 MWe**, date de démarrage **1968**, arrêté en **2006**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 4, 9.
- **Vandellos 1**, puissance électrique **480 MWe**, date de démarrage **1972**, arrêté en **1990**. Phase actuelle du démantèlement : 8.
- **Garona**, puissance électrique **446 MWe**, date de démarrage **1971**, arrêt à long terme depuis **2013**.

Suède

- **Agesta**, puissance électrique **10 MWe**, date de démarrage **1964**, arrêté en **1974**. Phase actuelle du démantèlement : 7.
- **Barseback 1**, puissance électrique **600 MWe**, date de démarrage **1975**, arrêté en **1999**. Phase actuelle du démantèlement : 4.
- **Barseback 2**, puissance électrique **600 MWe**, date de démarrage **1977**, arrêté en **2005**. Phase actuelle du démantèlement : 4.

Suisse

- **St Lucens**, puissance électrique **6 MWe**, date de démarrage **1968**, arrêté en **1969**. Phase actuelle du démantèlement : 1.

Royaume-Uni

- **Sizewell-A1**, puissance électrique **210 MWe**, date de démarrage **1966**, arrêté en **2006**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 5, 6.
- **Sizewell-A2**, puissance électrique **210 MWe**, date de démarrage **1966**, arrêté en **2006**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 5, 6.
- **Winfrith**, puissance électrique **92 MWe**, date de démarrage **1967**, arrêté en **1990**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 4, 9, 10.

- **Dounreay DFR**, puissance électrique **11 MWe**, date de démarrage **1962**, arrêté en **1977**. Phase actuelle du démantèlement : 5.
- **Dounreay PFR**, puissance électrique **234 MWe**, date de démarrage **1975**, arrêté en **1994**. Phase actuelle du démantèlement : 5.
- **Calder Hall 1**, puissance électrique **49 MWe**, date de démarrage **1956**, arrêté en **2003**. Phase actuelle du démantèlement : 8.
- **Calder Hall 2**, puissance électrique **49 MWe**, date de démarrage **1957**, arrêté en **2003**. Phase actuelle du démantèlement : 8.
- **Calder Hall 3**, puissance électrique **49 MWe**, date de démarrage **1958**, arrêté en **2003**. Phase actuelle du démantèlement : 8.
- **Calder Hall 4**, puissance électrique **49 MWe**, date de démarrage **1959**, arrêté en **2003**. Phase actuelle du démantèlement : 8.
- **Chapel Cross 1**, puissance électrique **48 MWe**, date de démarrage **1959**, arrêté en **2004**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 5, 6.
- **Chapel Cross 2**, puissance électrique **48 MWe**, date de démarrage **1959**, arrêté en **2004**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 5, 6.
- **Chapel Cross 3**, puissance électrique **48 MWe**, date de démarrage **1959**, arrêté en **2004**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 5, 6.
- **Chapel Cross 4**, puissance électrique **48 MWe**, date de démarrage **1960**, arrêté en **2004**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 5, 6.
- **Berkeley 1**, puissance électrique **138 MWe**, date de démarrage **1962**, arrêté en **1989**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 8.
- **Berkeley 2**, puissance électrique **138 MWe**, date de démarrage **1962**, arrêté en **1988**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 8.
- **Bradwell 1**, puissance électrique **123 MWe**, date de démarrage **1962**, arrêté en **2002**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 5 6.
- **Bradwell 2**, puissance électrique **123 MWe**, date de démarrage **1962**, arrêté en **2002**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 5 6.
- **Windscale AGR**, puissance électrique **24 MWe**, date de démarrage **1963**, arrêté en **1981**. Phase actuelle du démantèlement : 2, 3, 5, 6⁷⁷.

⁷⁷ Le démantèlement du réacteur de Winscale est présenté comme suit par la Nuclear Dismantling Authority (NDA) du Royaume-Uni : *Winscale, Advanced graphite Gas cooled Reactor, WAGR 28 MWe, 1963-1981*.

Objective: Safely dismantle process, and place into passive storage an industrial scale power generating nuclear reactor.

- **Hunterstone-A1**, puissance électrique **150 MWe**, date de démarrage **1964**, arrêté en **1990**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 5, 6.
- **Hunterstone-A2**, puissance électrique **150 MWe**, date de démarrage **1964**, arrêté en **1989**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 5, 6.
- **Hinkley Point-A1**, puissance électrique **235 MWe**, date de démarrage **1965**, arrêté en **2000**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 5, 6.
- **Hinkley Point-A2**, puissance électrique **235 MWe**, date de démarrage **1965**, arrêté en **2000**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 5, 6.
- **Trawsfynydd 1**, puissance électrique **195 MWe**, date de démarrage **1965**, arrêté en **1991**. Phase actuelle du démantèlement : 8.
- **Trawsfynydd 2**, puissance électrique **195 MWe**, date de démarrage **1965**, arrêté en **1991**. Phase actuelle du démantèlement : 8.
- **Dungeness-A1**, puissance électrique **225 MWe**, date de démarrage **1965**, arrêté en **2006**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 5, 6.
- **Dungeness-A2**, puissance électrique **225 MWe**, date de démarrage **1965**, arrêté en **2006**. Phase actuelle du démantèlement : 3, 5, 6.
- **Oldbury A-1**, puissance électrique **217 MWe**, date de démarrage **1967**, arrêt définitif depuis **2012**.
- **Oldbury A-2**, puissance électrique **217 MWe**, date de démarrage **1967**, arrêt définitif depuis **2011**.
- **Wylfa 2**, puissance électrique **490 MWe**, date de démarrage **1971**, arrêt définitif depuis **2012**.

États-Unis⁷⁸

- **Shippingport**, puissance électrique **60 MWe**, date de démarrage **1957**, arrêté en **1982**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.

First nuclear power decommissioned in the UK, with the completion of the final campaign of a twenty years project.

Story: Built in the 60, connected to the grid in 1963, operating life of 19 years. Shut down in March 1981. Selected as the UK national demonstration exercise for the decommissioning project of a power nuclear reactor. The first years of the decommissioning project were spent designing the necessary components, modifying the structure and installing the equipment. The work was organized in 20 campaigns. The dismantling and decommissioning skills built up through the WAGR project will be used in other high-hazard reduction projects and the wider nuclear industry.

⁷⁸ Nous comprenons dans cette liste les indications publiés par la NRC [5, 8, 9, 10-13, 15, 51, 84], concernant les réacteurs de puissance des États-Unis.

- **Elk river**, puissance électrique **22 MWe**, date de démarrage **1963**, arrêté en **1968**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Piqua**, puissance électrique **12 MWe**, date de démarrage **1963**, arrêté en **1966**. Phase actuelle du démantèlement : 11.
- **Indian Point-1**, puissance électrique **257 MWe**, date de démarrage **1962**, arrêté en **1974**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Bonus**, puissance électrique **17 MWe**, date de démarrage **1964**, arrêté en **1968**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Kewaunee**, puissance électrique **566 MWe**, date de démarrage **1974**, arrêté en **2013**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **GE Vallecitos**, puissance électrique **24 MWe**, date de démarrage **1957**, arrêté en **1963**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Hallam**, puissance électrique **75 MWe**, date de démarrage **1963**, arrêté en **1964**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Dresden 1**, puissance électrique **197 MWe**, date de démarrage **1960**, arrêté en **1978**. Phase actuelle du démantèlement : 11.
- **Pathfinder**, puissance électrique **59 MWe**, date de démarrage **1966**, arrêté en **1967**. Phase actuelle du démantèlement : 11.
- **Humbolt bay**, puissance électrique **63 MWe**, date de démarrage **1963**, arrêté en **1976**. Phase actuelle du démantèlement: 3, 4, 6, 9, 11.
- **CVTR**, puissance électrique **17 MWe**, date de démarrage **1963**, arrêté en **1967**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Crystal River**, puissance électrique **860 MWe**, date de démarrage **1977**, arrêté en **2013**.
- **Saxton**, puissance électrique **3 MWe**, date de démarrage **1967**, arrêté en **1972**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Big rock point**, puissance électrique **67 MWe**, date de démarrage **1962**, arrêté en **1997**. Phase actuelle du démantèlement : 7.
- **Enrico Fermi**, puissance électrique **61 MWe**, date de démarrage **1966**, arrêté en **1972**. Phase actuelle du démantèlement : 9, 11.
- **Peach Bottom**, puissance électrique **40 MWe**, date de démarrage **1967**, arrêté en **1974**. Phase actuelle du démantèlement⁷⁹ : 1.

⁷⁹ Peach Bottom est un réacteur modéré par du graphite et refroidi par de l'hélium. Fort-Saint-Vrain était aussi modéré par du graphite et refroidi par du gaz (hélium). Signalons le texte

- **San Onofre 1**, puissance électrique **436 MWe**, date de démarrage **1967**, arrêté en **1992**. Phase actuelle du démantèlement : 4.
- **San Onofre 2**, puissance électrique **1 070 MWe**, date de démarrage **1982**, arrêté en **2013**. Phase actuelle du démantèlement : 4.
- **San Onofre 3**, puissance électrique **1 080 MWe**, date de démarrage **1983**, arrêté en **2013**. Phase actuelle du démantèlement : 4.
- **Hadam Neck**, puissance électrique **560 MWe**, date de démarrage **1967**, arrêté en **1996**. Phase actuelle du démantèlement : 4, 6.
- **Millstone-1**, puissance électrique **641 MWe**, date de démarrage **1970**, arrêté en **1998**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Fort Saint Vrain**, puissance électrique **330 MWe**, date de démarrage **1976**, arrêté en **1989**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Yankee NPS**, puissance électrique **167 MWe**, date de démarrage **1960**, arrêté en **1991**. Phase actuelle du démantèlement : 4, 6.
- **Zion-1**, puissance électrique **1 040 MWe**, date de démarrage **1973**, arrêté en **1998**. Phase actuelle du démantèlement : 1.
- **Zion-2**, puissance électrique **1 040 MWe**, date de démarrage **1973**, arrêté en **1998**. Phase actuelle du démantèlement : 1.
- **Maine Yankee**, puissance électrique **860 MWe**, date de démarrage **1972**, arrêté en **1997**. Phase actuelle du démantèlement : 4 (ce réacteur est analogue aux REP 900 d'EDF).
- **Rancho seco-1**, puissance électrique **873 MWe**, date de démarrage **1974**, arrêté en **1989**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Three Mile Island-2**, puissance électrique **880 MWe**, date de démarrage **1978**, arrêté en **1979** à la suite d'un accident. Phase actuelle du démantèlement : 11.

intégral de l'Electricity Power Research Institute (EPRI) relatif aux phénomènes physiques liés au graphite irradié. A 2006 report commissioned by EPRI states: 'The **graphite** moderators of retired gas cooled nuclear reactors present a difficult challenge during demolition activities. As a result, utilities have not dismantled any moderators of CO₂ cooled power reactor today'. However, it concludes that "adequate information exists to enable the safe dismantling and processing of graphite moderators, and that the three main options for disposal of this graphite are oxidation to the gas phase and release as carbon dioxide (difficult), direct burial, or recycling into new products for the nuclear industry. In each case, opportunities exist for preprocessing to concentrate or remove radionuclides to enhance the safety of the chosen option. The radionuclide inventory of irradiated graphite is unusual in comparison with other nuclear waste. **Cobalt-60 and tritium** are the principal isotopes of short term importance, carbone-14 (demi-vie β : 5730 ans) and Chlore-36 are dominant in the long term'.

- **ShoreHam**, puissance électrique **820 MWe**, date de démarrage **1986**, arrêté en **1989**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Trojan**, puissance électrique **1095 MWe**, date de démarrage **1975**, arrêté en **1992**. Phase actuelle du démantèlement : indéfinie.
- **Lacrosse**, puissance électrique **48 MWe**, date de démarrage **1968**, arrêté en **1987**. Phase actuelle du démantèlement : 7.
- **Connecticut Yankee**, puissance électrique **67 MWe**, date de démarrage **1967**, arrêté en **1997**.

Encadré 12 – Comparaison des États-Unis avec l'Europe et le Monde

Au total, environ 100 réacteurs électronucléaires (à 111, suivant la date d'examen et l'état-arrêt provisoire ou redémarrage⁸⁰ ou inauguration de la centrale) sont en fonctionnement aux États-Unis. Ils ont une capacité de 99 GWe et produisent environ 790 térawatts par an. Leur âge moyen est de 33,4 ans. Le nombre de réacteurs arrêtés⁸¹ est de **31**.

À titre de comparaison, citons les caractéristiques analogues pour l'Union européenne :

centrales électronucléaires de **l'Union européenne** : **131** réacteurs en fonctionnement en 2013, d'une puissance installée de **121 GWe**, d'âge moyen **29 ans**, la plus grande partie allant d'un âge de **25 ans** à **33 ans**. Pour les centrales électronucléaires les plus âgées, elles ont **34 ans** (2 réacteurs), **35 ans** (3 réacteurs), **36 ans** (4 réacteurs), **37 ans** (3 réacteurs), **38 ans** (2 réacteurs), **39 ans** (4 réacteurs), **40 ans** (1 réacteur), **42 ans** (2 réacteurs) ;

et pour le monde :

- centrales électronucléaires du **monde entier** : **434** réacteurs en fonctionnement au 31 décembre 2013, d'une puissance installée de **372 GWe**, d'âge moyen **28 ans**.

⁸⁰ La liste des projets en cours de nouveaux réacteurs de puissance est donnée en [84].

⁸¹ Le rapport annuel du gouvernement américain (voir [83]) stipule en page 45 : 'NRC has the authority to issue initial operating licenses for commercial nuclear power plants for a period of 40 years. Decisions to apply for operating license renewals are made entirely by nuclear power plant owners, and typically, they are based on economics and the ability to meet NRC requirements'.

Il paraît y avoir une analogie entre les modèles de réacteurs et les niveaux de puissances du parc nucléaire des États-Unis et celui de l'UE. Mais elle s'estompe si on ne compare, dans l'UE, que la France, particulière par : **1.** le cycle de combustible avec retraitement, **2.** l'emploi des MOX, **3.** le même réacteur pour toutes les centrales⁸², **4.** le même exploitant, **5.** le même industriel qui construit, **6.** le même établissement de recherche, **7.** le même distributeur d'électricité, etc. ;

- récapitulation des choix parmi les trois **options** de l'IAEA aux États-Unis : **12** réacteurs avec SAFESTOR, **10** avec DECON ont évolué au cours du temps, ainsi San Onofre 1, fermé en 1992 en SAFESTOR, puis transformé en DECON et quasi terminé en 2008. En tout, **31** sont actuellement arrêtés.

En résumé, le 31 décembre 2012, l'IAEA note que **435** réacteurs de puissance sont en opération **dans le monde**, « environ » **149** ont été arrêtés, dont **95** pour des raisons économiques, n'étant plus rentables, **11** suite à des incidents, **25** pour des raisons politiques, **45** réacteurs prototypes, **250** réacteurs d'études ou d'enseignement, ou de production.

Sur ceux-là, **8** ont été *decommissioned*, puis démantelés, le site étant rendu à un usage libre de toute contrainte [19, 103, 114, 116, 117].

De plus, **15** réacteurs de puissance ont été complètement démantelés et rendus à usage libre, avec des tâches partielles à assurer, **50** réacteurs sont en cours de démantèlement et **50** ont été partiellement démantelés avant diminution de la radioactivité à long terme (*safe enclosure*)⁸³.

De tous ces éléments, on peut tirer le bilan qu'en fait la *World Nuclear Association* à la date de **mars 2014** : *'to date, about 100 mines, over 100 commercial power reactors, 46 experimental or prototype reactors; over 250 research reactors and a number of fuel cycle facilities, have been retired from operation. Some of these have been fully dismantled. Most parts of a nuclear power plant do not become radioactive, or are contaminated at only very low levels. Most of the metal can be recycled. Proven techniques and equipment are available to dismantle nuclear facilities safely and these have now been well demonstrated in several parts of the world'*.

⁸² Les REP 900, les REP 1300, les N4, ont les mêmes catégories de composant, de combustible, de physique, de chimie, de matériaux, etc.

⁸³ « Les raisons des arrêts sont le plus souvent multifactorielles. Elles ne sont précisées et commentées que pour les 119 réacteurs démantelés ou en cours de démantèlement, et encore, pas de manière spécifique. Des raisons économiques sont évoquées dans 44 cas, techniques dans 58 cas et politiques dans 35 cas ». Les sources de ces informations sont notamment : <http://www.world-nuclear.org/info/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/decommissioning-nuclear-facilities/> ainsi que l'IAEA, la NEA/OCDE, la NRC des États-Unis.

ANNEXE 2

Liste des réacteurs endommagés dans le monde et des phénomènes scientifiques et techniques rencontrés lors de leur démantèlement

Parmi les réacteurs arrêtés, citons les onze qui l'ont été suite à un **accident ou à un sévère incident**. Leur démantèlement nécessite des procédés particuliers⁸⁴. Afin de conserver la convention de qualification qui en a été effectuée, nous citons les causes en anglais.

Allemagne

- Greifswald, *Partial core melt*.
- Gundremmingen, *Botched shutdown*.

Japon

- Fukushima Daiichi 1, *core damage from cooling loss*.
- Fukushima Daiichi 2, *core damage from cooling loss*.
- Fukushima Daiichi 3, *core damage from cooling loss*.
- Fukushima Daiichi 4, *damage from hydrogen explosion*.

Des actions de recherche sont engagées au Japon pour franchir les verrous du démantèlement des centrales de Fukushima Daiichi 1, 2, 3 et 4. Les organismes participant aux travaux de **recherche** sont : JAEA, AIST, CRIEPI, Academic Experts et le International Research Institute for nuclear Decommissioning (IRID), créé en août 2013 au Japon.

Slovaquie

- Bohunice, *Core damage from fuelling error*.

Espagne

- Vandellos, *turbine fire*.

⁸⁴ Notons le bilan des chantiers des États-Unis à ce jour : 'many R and D activities are needed to be conducted in parallel to the defueling procedures'.

Suisse

- Saint Lucens, *core melt*.

Ukraine

- Tchernobyl 4, *fire and melt down*.

États-Unis

- Three Mile Island, *Partial core melt*⁸⁵.

Pour les trois accidents graves, Three Mile Island-2, Tchernobyl, Fukushima, soulignons que, pour tous trois, **l'explosion de l'hydrogène a été déterminante de la gravité de l'accident** : la réaction chimique entre le métal et l'eau du caloporteur a dégagé l'hydrogène. L'air et la source chaude ont déclenché une deuxième réaction chimique, combustion, déflagration, explosion.

Les réacteurs de puissance qui ont été arrêtés par une décision politique sont au nombre de 25.

Les réacteurs arrêtés parce qu'ils ont satisfait à leur objectif ou qu'ils ne sont plus économiquement rentables sont au nombre de **84**. En France, il y en a **11**. En Allemagne, avant l'arrêt général programmé, il y en avait **11**. En Russie⁸⁶, il y en a **5**. Au Royaume-Uni, il y en a **13**. Aux États-Unis, il y en a **26**.

En revenant à l'encadré 4 du chapitre, insistons sur le fait que la radioactivité de toutes les centrales électronucléaires en démantèlement, achevé ou non, ne représente qu'environ 1 % de la radioactivité du cycle de combustible. De plus, ce rapport va encore diminuer d'ordre de grandeur en quelques décennies car les radionucléides qui la causent sont le fer 55 (demi-vie 2,7 ans), le fer 59 (demi-vie 45 jours), le nickel 63 (demi-vie 100 ans), le cobalt 60 (demi-vie 5,2 ans), à comparer aux demi-vies de plusieurs centaines d'années des actinides cités dans cet encadré 4. Il en résulte que la garantie demandée au stockage définitif des déchets radioactifs issus du démantèlement des centrales électronucléaires ne doit s'exercer que sur quelques centaines d'années et non plus sur des dizaines à centaine de milliers d'années, comme pour les déchets radioactifs du cycle du combustible.

⁸⁵ **L'échelle de gravité (dite « INES scale »)**, notée de 1 à 7, a classé cet accident ayant eu un dommage sur les combustibles en 5, comme l'accident sur NRX (1952) au Canada, Winscale (1957) déjà signalé plus haut, Lucens (1969) en Suisse vu plus haut. Les accidents endommageant le combustible et classés en 4 sont : SL-1 (1961) aux États-Unis, petit prototype PWR, Chapelcross (1967) au Royaume-Uni, Magnox, Fermi 1 (1968) aux États-Unis, Agesta (1968) en Suède, St-Laurent-des-Eaux (1968) en France, réacteur Graphite Gaz, et Bohunice A1 (1977) en Slovaquie, déjà cité.

⁸⁶ Les motifs de l'arrêt ne sont pas spécifiés.

Références

- [1] Dautray R., Brézin E. (Guest editors) (2012). Science of nuclear safety post-Fukushima, *C. R. Physique* 13(4).
- [2] Dautray R. (2001). *L'énergie nucléaire civile dans le cadre temporel des changements climatiques*, rapport à l'Académie des sciences. Tec & Doc Lavoisier, Paris.
- [3] Blue Ribbon commission (2012). USA, suite à Fukushima.
- [4] U.S.NRC: Location of complex material, 2013.
- [5] U.S.NRC: Decommissioning of nuclear facilities, 2013.
- [6] U.S.NRC: Policies and strategies, 2013.
- [7] U.S.NRC: Nuclear power reactor, 2013.
- [8] U.S.NRC: Safety assessment of decommissioning, 2013.
- [9] U.S.NRC: Oversight material sites undergoing decommissioning, 2013.
- [10] U.S.NRC: Oversight of materials and reactor decommissioning, 2013.
- [11] U.S.NRC: Locations of test reactors sites undergoing decommissioning, 2013.
- [12] U.S.NRC: Location fuel cycle facilities sites undergoing decommissioning, 2013.
- [13] U.S.NRC: Location of power reactor sites undergoing decommissioning (10), 2013.
- [14] U.S.NRC: Locations of uranium recovery sites undergoing decommissioning (24 title II), 2013.
- [15] U.S.NRC: Sites undergoing decommissioning (55), 2013. Distinguer les responsabilités administratives, soit par l'État (17 dans 10 États), soit la NRC fédéral.
- [16] U.S. Nuclear energy institute et CASL : Consortium for Advanced Simulation of Light Water Reactors (CASL). htm; 2013 et U.S. nuclear energy institute: document 1,2,3, 2013.
- [17] U.N.IAEA: Safety assessment for the decommissioning of facilities using radioactive material safety guard, 2012.

- [18] U.N.IAEA: Policies and strategy for the decommissioning of nuclear and radiological facilities, 2012.
- [19] U.N.IAEA: Selection and use of performance indicators for decommissioning, 2011.
- [20] U.N.IAEA: Design lessons drawn from the decommissioning of nuclear facilities, 2011.
- [21] NEA/OCDE : Constantes nucléaires, 2013.
- [22] NEA/OCDE: Decommissioning policies for nuclear facilities, 1992.
- [23] NEA/OCDE: International cooperation on decommissioning, 1992.
- [24] NEA/OCDE: Decommissioning nuclear power plants - Policies, strategies and costs, 2013.
- [25] NEA/OCDE: Decommissioning funding: ethics, implementation uncertainties, 2006.
- [26] Listes des réacteurs de puissance du monde avec leur situation. <http://www.world-nuclear.org/info/inf19.html>
- [27] IAEA (2007). *International Decommissioning Network*. IAEA, Terms of reference.
- [28] Daustray R. (2005). *Les isotopes du plutonium et leurs descendants dans le nucléaire civil*, rapport à l'Académie des sciences. Tec & Doc Lavoisier, Paris.
- [29] Guillaumont R. (2003). Update on the chemical thermodynamics of uranium, neptunium, plutonium, americium and technetium. *Chemical thermodynamics*, 5, AEN/NEA. Elsevier.
- [30] Magill J., Pfennig G., Galy J. (2006). *Karlsruher Nuklidkarte*, 7^e édition. Commission européenne, Karlsruhe, ITU.
- [31] Balian R. (2001). Physique fondamentale et énergétique. Les multiples visages de l'énergie. École d'été de physique sur l'énergie. Caen, 27 août 2001.
- [32] Bamberger Y., Marigo J.J., Cannard G. (1983). *Microfissuration du béton et propagation d'ondes ultrasonores*. Springer.
- [33] Was Gary S. (2007). *Fundamentals of radiation materials science, metals and alloys*. Springer.
- [34] Académie des sciences. Carpentier A., Baulieu E., Brézin E., Friedel J. et Valleron A.J. coord. (2012). *L'accident majeur de Fukushima*.

Considérations sismiques, nucléaires et médicales. EDP Sciences, Paris.

- [35] Académie des sciences. Quéré Y., Bréchet Y., Sanz G. coord. (2011). *La métallurgie. Science et ingénierie.* Académie des sciences et Académie des technologies. EDP Sciences, Paris.
- [36] International structure for decommissioning costing of nuclear installations, AEN/nuclear energy agency No. 7088, OECD 2012, dont les "Terms of reference".
- [37] Bréchet Y. *Les matériaux du nucléaire.* Cours au Collège de France, 2012/2013.
- [38] Dautray R., Friedel J., Bréchet Y. (2012). Réflexions sur l'avenir de l'énergie nucléaire, de la France d'aujourd'hui au monde de demain : II^e à IV^e générations. *C. R. Physique*, 13 5 : 480-518.
- [39] Martin G., Bellon P. (1997) Driven alloys, *Solid state Phenom* 50 189-331.
- [40] Beremin F.M., Pineau A., Mudry F., Devaux J. (1983). A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel. *Metallurgical transaction A* 14A:1983-2277.
- [41] Boullis B., Baron P., Masson M., Rostaing C. (2007). *Advanced separation processes for sustainable nuclear systems.* Scitech Connect, CEA/DEN Global conference, 9-13 sept. 2007, Idaho national laboratory, USA.
- [42] Zemb T. (2010). Institut de chimie séparative de Marcoule, CEA-CNRS-ENSCM.
- [43] Guidez J. (2012). *Phénix, le retour d'expérience.* CEA/DEN.
- [44] Académie des sciences, Rapport n° 38, Gros F. coord. (1997). *Problems associated with the effects of low doses of ionising radiations.* Tec & Doc Lavoisier, Paris.
- [45] Salençon J. (2000). *Handbook of continuum mechanic, general concepts, thermoelasticity.* Springer, École polytechnique.
- [46] Cour des comptes (2005). *Le démantèlement des installations nucléaires et la gestion des déchets radioactifs.* Rapport public, Les éditions des journaux officiels, janvier 2005.
- [47] Champion D. *et al.* The IRSN's earliest assessments of the Fukushima accident's consequences of the terrestrial environment in Japan. *Radio-protection* (2013) 48(1):11-37.

- [48] Hideyuki Kanda *et al.* Comparing acquisition of radiation health knowledge and preventive behavior of working adults during and after the Fukushima disaster, 18 July 2013, Radioprotction.org.
- [49] Académie des sciences, Marsily (de) coord. (2006). *Les eaux continentales*. EDP Sciences, Paris.
- [50] EPRI (2006). *Graphite decommissioning: options for graphite treatment, recycling or disposal, including a discussion of safety related issues*. Palo-Alto, CA, March 2006.
- [51] U.S.NRC: Frequently asked questions about reactor decommissioning, may 2013.
- [52] Dautray R. (2007). *Sécurité et utilisation hostile du nucléaire civil, de la physique à la biologie*. Rapport à l'Académie des sciences. Tec & Doc Lavoisier, Paris.
- [53] NEI (2013). Nuclear Energy Institute, *Reactor shut down or decommissioned*, nei.org.
- [54] IRSN (2002). Colle C., Adam C., Fiche radionucléide, Cl 36 et environnement, 08/01/2002.
- [55] IRSN (2013). *Modèle de relâchement de corps radioactifs par des combustibles usés en stockage direct*. Rapport IRSN n° 2013-00001.
- [56] Fisher N. *et al.* Evaluation of radiation doses and associated risk from the Fukushima nuclear accident to marine biota and human consumers of seafood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, june 2013.
- [57] NEA/OCDE: Radioactive Waste management, the 'Radioactive Waste Management Committee' (RWMC). The RWMC is assisting member countries for the decommissioning of obsolete nuclear facilities. Annex A: List of NEA documents on decommissioning and dismantling of nuclear facilities. Annex B: List of NEA documents on decommissioning and decontamination of nuclear facilities. Annex C: List of IAEA publications on decommissioning and decontamination of nuclear facilities, NEA, Technical programs, 2013.
- [58] EDF (2013). *Les études de stockage ou destruction du graphite irradié en France et au Royaume-Uni*.
- [59] Académie des sciences, Pineau A., Quéré Y. (coord.) (2011). Annexe 12 : les matériaux du nucléaire. In : *La métallurgie science et ingénierie*. Académie des sciences - Académie des technologies. EDP Sciences, Paris.

- [60] Suzuki Shunichi (2013). *Mid-and long term road map and action plan for decommissioning of the reactors 1 to 4 of the TEPCO Fukushima Dai-ichi nuclear plants*. october 10, 2013. Tokyo Electric Power Company, Science Council of Japan.
- [61] Fong P. (1961). Nuclear models and nuclear fission. *Phys Rev* 122:1545.
- [62] IRSN (2013). Fiches *Radionucléides*, Internet.
- [63] Boutard J.-L. *et al.* (2008). Fissile core and tritium-breeding blanket: structural materials and their requirements, *C. R. Physique* 9:287-302.
- [64] Lindau R. *et al.* (2005). *Fusion engineering design* 75-79:989-996.
- [65] Gros F. *et al.* (1999). Colloque « Risques cancérogènes dus aux rayonnements ionisants ». *C. R. Académie des sciences*, tome 322, 2-3:81-256.
- [66] ASN (2012). *La gestion des sites et sols pollués par de la radioactivité*, Contrôle. Autorité de sûreté nucléaire, n° 195.
- [67] Mousset F. (2004). *Électro-volatilisation du ruthénium en milieu nitrique, influence de la nature des formes chimiques du ruthénium et de la composition des solutions, modèles de dissolution*. Thèse, École nationale supérieure de chimie de Paris.
- [68] Andra (2012). *Inventaire de la radioactivité présente en France en fin 2012*. www.andra.fr
- [69] La radioactivité.com. Quelles durées. Prolonger les entreposages industriels actuels, 2013.
- [70] Areva. *Gestion et traitement des déchets technologiques*. www.areva.com
- [71] Recherches sur les déchets. <http://nucleaire.fr>
- [72] Guillaumont R. (2013). *Déchets radioactifs, gestion opérationnelle*, Encadré 5- Colis de déchets MAVL et HAVL et encadré 6, matrice de colisage. BN 3 661v2-10, Éditions Techniques Ingénieurs.
- [73] Quatrième rapport national sur la mise en œuvre des obligations de la Convention commune. Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs. Septembre 2011.
- [74] Lederer C.M., Shirley V.S., Browne E. *et al.* (1978). *Table of isotopes*, Wiley, New York, 7th edition.

- [75] Dautray R., Friedel J., Bréchet Y. (2012). Réflexions sur l'avenir de l'énergie nucléaire, de la France d'aujourd'hui au monde de demain : II^e à IV^e générations, *C. R. Physique* 13(5): 480-518.
 - [76] Bailly du Bois P. (2012). *Exemple de modélisation française pour étudier la dynamique des masses d'eau océaniques*, Annexe 13 de la partie santé de [34], IRSN, 2012.
 - [77] Guillaumont R. (2011). *Retour d'expérience de Fukushima, recherches sur le combustible nucléaire*. Annexe 8 de la partie nucléaire de [34], 17 juin 2011.
 - [78] Guillaumont R. (2004). Éléments chimiques à considérer dans l'aval du cycle nucléaire. *C. R. Chimie* 7:1129-1134.
 - [79] Métivier H. (2011). *Analyse du rapport UNSCEAR 2011*, Annexe D, Aspects environnementaux de l'accident de Tchernobyl. Annexe 10 de [34].
 - [80] Valleron A.-J. (2011). *Tchernobyl : conséquences de santé autres qu'en termes de mortalité*. Annexe 8 de la partie santé de [34].
 - [81] Niel J.-C. *et al.* (2012). La gestion des sites et sols pollués par de la radioactivité, Contrôle 195, Autorité de sûreté nucléaire, novembre 2012.82.
- Ewing R.C. (2008). Nuclear fuel cycle: environmental impact. A publication of the Material Research Society (33):338-342.
- [82] Schneider M., Frogatt A. *et al.* (2013). *World nuclear industry status report*.
 - [83] DOE (2013). *Annual energy outlook*. Department of energy. www.DOE.gov
 - [84] Site des projets de réacteurs de puissance en cours de réalisation : www.nrc.gov/reactors/new-reactors.html.
- De plus, sur cette adresse internet de la NRC, figurent les détails de chaque installation nucléaire existante, avec la description de son emplacement.
- [85] Mathers D. (2013). The thorium fuel cycle, NNL (UK's National Nuclear laboratory), thEC.
 - [86] Boucau J. (2013). Westinghouse, RGN.
 - [87] Ensuque A. (2013). CIDEN/EDF, RGN.
 - [88] Cahen B. (2013). Andra, RGN.

- [89] NDA/UK Business Plan, 2013-2016, 34 pages, Nuclear Decommissioning Authority, SG/2013/28. Ce document consacre une page complète à chaque « site restoration », y compris les autres installations que les réacteurs de puissance, usines de séparation chimique (Sellafield), de séparation isotopique (Capenhurst), laboratoire d'études nucléaires (Harwell), etc. Un rapport annuel (*Annual Report and accounts*) est rédigé et distribué aux hautes autorités du Royaume-Uni ainsi qu'à tout public par Internet (<http://www.dna.gov> ; UK. document 8).
- [90] Fanguet C. (2013). ASN, RGN.
- [91] Bergh N. *et al.* (2013). Waste management strategy for dismantling wastes to reduce costs for power plant decommissioning. Westinghouse. RGN 4:42-47.
- [92] Krause G. (2013). Treatment and volume reduction of large components as heat exchangers, steam generators and boilers. Studsvik nuclear AB. RGN 4: 48-53.
- [93] Aubonnet E., Dubot D. (2013). Radiological characterization for decommissioning-methodology, approach and example of a nuclear facility. CEA, Évaluation radiologique. RGN 4:54-62.
- [94] Pombet D. *et al.* (2013). Destructive testing: dry drilling operations with TruPro system to collect samples in a powder form; from a hull containing sludge immobilised in a hydraulic binder. RGN 4: 63-68.
- [95] Hedin G. *et al.* (2010). Decommissioning planning for Swedish operating NPP's, 3rd international conference on environmental remediation and radioactive waste management. ICEM 2010, Ysukuba, Japan, ASME.
- [96] Radiation protection 118 (2000). Recommended radiological protection criteria for the clearance of building and building rubbles for the dismantling of nuclear installations. European commission.
- [97] Lidar P. *et al.* (2011). New techniques for radiological survey of the P2 reactor decommissioning project. 10th EPRI decommissioning project and radioactive waste management workshop, Lund, Sweden, EPRI.
- [98] Andra (2012). Inventaire national 2012 : Rapport de synthèse 2012.
- [99] Andra. Inventaire national 2010 : Rapport en résumé 2012.
- [100] Andra. Inventaire national 2010 : Rapport géographique 2012.
- [101] Andra. Inventaire national 2010 : Rapport des fonctions 2012.

- [102] Académie des sciences (Gros F., Tubiana M. coord.) (1995). *Problèmes liés aux effets des faibles doses des radiations ionisantes*. Rapport n° 34. Tec & Doc Lavoisier, Paris.
- Et l'édition en langue anglaise, considérablement augmentée : *Problems associated with the effects of low doses of ionising radiations*, Rapport n° 38, 1997.
- [103] International Commission on Radiological Protection (2014). *Protection of the environment under different exposure situations*. ICRP publication 124, Ann. ICRP 43(1).
- [104] Rapport AIEA/UNSCEAR, Fukushima 2014.
- [105] Académie des sciences (Carpentier A., Baulieu E.-E., Brézin E., Friedel J., coord.) (2011). *L'accident majeur de Fukushima*, EDP Sciences, Paris.
- [106] Cohen B.L. : concepts of nuclear physics. Mac Graw Hill, par exemple, Chapter 11, p. 269-288, pour le « beta decay », 1971.
- [107] Bailly H., Menessier D., Prunier C. (1996). *Le combustible nucléaire des réacteurs à eau sous pression et des réacteurs rapides*. Collection CEA, série Synthèses. Eyrolles, Paris.
- [108] Académie des sciences (Bourrelier P.-H. coord.) (1998). *Contamination des sols par les éléments en traces : les risques et leur gestion*. Tec & Doc Lavoisier, Paris.
- [109] Académie des sciences (Colin F., Petit M. coord.) (2000). *Pollution localisée des sols et des sous-sols par les hydrocarbures et les solvants chlorés*. Tec & Doc Lavoisier, Paris.
- [110] Gueguénat P., Germain P., Métivier H. (1996). *Radionuclides in the ocean, inputs and inventories*. IPSN, Les éditions de physique, Paris.
- [111] Cowan R. (1981). *The theory of atomic structure and spectra*. University of California Press.
- [112] Giancoli D.C. (2012). *Physics, principles with applications*, Pearson Prentice Hall, sixth edition. http://wps.prenhall.com/esm_giancoli_physicsppa_6/
- [113] Grenèche D. (2014). Une comparaison entre les réacteurs à eau pressurisée et les réacteurs à eau bouillante. Panorama mondial des réacteurs nucléaires de troisième génération. RGN 1:20- 37.
- [114] RGN (2013). Les défis du démantèlement : une réalité industrielle, des perspectives ; Conférence internationale, 7-11 avril 2013. RGN 4.

- [115] Bergh N. *et al.* (2013). Waste management strategy for dismantling waste to reduce costs for power plant decommissioning. *RGN* 4:42-47.
- [116] Thierfelt S., Schartmann F. (2010). *Decommissioning of nuclear installations in Germany; Experiences and perspectives*. Compiled for the German federal ministry of education and research. Brenk systemplanung, Aachen.
- [117] ISOE: the Information System on Occupational Exposure, created by the OECD Nuclear Energy Agency in 1992 to promote and coordinate international cooperative undertakings in the area of occupational radiological protection at nuclear power plants.
- [118] IAEA (1999). *Decommissioning of nuclear plants and research reactors. Safety guide*. IAEA safety standards series, DS452.
- [119] IAEA (1999). *Application of the concepts of Exclusion, Exemption and Clearance*. Safety Guide, N° RS-G-1.7.
- [120] NEA, Committee on radiation protection and public health (CRPPH).
- [121] NEA, Expert group on occupational exposure (EGOE).
- [122] NEA, Expert group on best available techniques (EGBAT).
- [123] IAEA (1996). *International Basis Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and the for the Safety of Radiation sources (the BSS)*. Safety Series, N° 115, IAEA, Vienna. FAOUN, IAEA, OCDE, NEA, WHO, UN, PAEHO, ILO.
- [124] IAEA (2011). *Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards*. Interim edition. General safety requirements. IAEA, Vienna.
- [125] Guidez J. (2012). *Phénix, le retour d'expérience*. CEA.
- [126] Adloff J.P., Guillaumont R. (1993). *Fundamentals of radiochemistry*. CRC.
- [127] Weinberg A., Wigner E. (1958). *The physical theory of neutrons chain reactors*. The University of Chicago press.
- [128] Bussac J., Reuss P. (1985). *Traité de neutronique*. Hermann, Paris.
- [129] Allison M., Ewing R.C. editors (2006). *Uncertainty underground. Yucca mountain and the nation's high-level waste*, MIT press.

- [130] Cordes H. (2013). The federal state's centre of competence in nuclear decommissioning, dismantling and disposal, in Germany. EWN, Energie werke Nord GmbH; ESK/GPD meeting 2013.
- [131] Scharmann F. (2013). Decommissioning in Germany. Current developments, ESK, Brenk Systemplanung, GmbH, Aachen (Germany), ESK, 4th GPD-ESK, meeting, September 2013.
- [132] Nuclear energy agency/OCDE (2011). Decontamination and dismantling of radioactive concrete structures, Radioactive waste management committee (RWMC), 21 july 2011, NEA/RWM/CPD(2010)3.
- [133] Working party on decommissioning and dismantling (WPDD), Nuclear Energy Agency, 19 march 2014, Summary record of the 14th session of the WPPP.
- [134] Champion D. *et al.* (2013). The IRSN's earliest assessments of the Fukushima accident's consequences for the terrestrial environment in Japan. *Radioprotection* 48(1):11-37.
- [135] IAEA (1996). *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and the for the Safety of Radiation sources (the BSS)*. Safety Series N° 115, IAEA, Vienna. FAOUN, IAEA, OCDE, NEA, WHO, UN, PAEHO, ILO.
- [136] Rapport de la Commission nationale d'évaluation du financement des charges de démantèlement des installations nucléaires de base et de gestion des combustibles usés (juillet 2012). Note gouvernementale sur le coût du démantèlement. Rapport au Parlement, au Gouvernement et au Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire, rendu public en juillet 2012.
- [137] IAEA (2011). *Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards*. Interim edition. General safety requirements. IAEA, Vienna.
- [138] IAEA (1999). *Application of the concepts of Exclusion, Exemption and Clearance*. Safety Guide, N° RS-G-1.7.
- [139] Allison M., Ewing R.C. editors (2006). *Uncertainty underground. Yucca mountain and the nation's high-level waste*. MIT press.
- [140] Lefèvre J. (sous la direction de) (1986). *Les déchets nucléaires*. Collection CEA, série synthèses. Eyrolles, Paris.
- [141] IAEA (2013) *Report on decommissioning and remediation after a nuclear accident*. International experts meeting, 28 january -1 february 2013, Vienna, Austria.

- [142] IAEA (2015). *Report PRIS decommissioning module recently with 149 power reactor units.*
- [143] IAEA. Report Table 1-2. *Levels for exemption of bulk amounts of solid material without further consideration and for clearance of solid material without further consideration: activity concentrations of radionuclides of artificial origin.*
- [144] IAEA. Report Table 1-3. *Levels for clearance of material: activity concentrations of radionuclides of natural origin.*
- [145] IAEA. Safety reports series, No. 44. *Derivation of activity concentrations values for Exclusion, Exemption and clearance.*
- [146] IAEA. Safety reports series, No. 67. *Monitoring for compliance with exemption and clearance levels.*