

ATELIER *LES DECHETS*

1^{er} semestre - Année 2013-2014



Sommaire

Introduction.....	3
I. Définition, origine et classification du déchet radioactif.....	4
1. Qu'est-ce qu'un déchet ou une matière radioactive ?	4
2. D'où proviennent les matières et déchets radioactifs ?	4
3. Classification des déchets radioactifs.....	5
II. Histoire du déchet radioactif.....	7
1. Découverte de la radioactivité.....	7
2. Industrialisation militaire du nucléaire et prise de conscience de la dangerosité des déchets radioactifs	7
a. Le site d'Hanford, aux Etats-Unis	7
b. Le complexe de Mayak, en Union Soviétique	8
3. Déchets nucléaires et incidents plus récents.....	9
a. Contamination à West Valley (USA).....	9
b. Incendie dans l'usine de retraitement de La Hague (France).....	10
c. Incident de Sellafield, anciennement Windscale (Angleterre).....	10
III. Les politiques de gestion et de traitement des déchets nucléaires.....	11
1. Les rejets radioactifs et normes associées	11
a. L'immersion des déchets radioactifs	11
b. Les rejets accidentels majeurs	15
2. Les solutions de gestion des déchets existantes	17
a. A court terme	18
b. A long terme.....	20
Conclusion	24
BIBLIOGRAPHIE.....	25

Introduction

Après l'utilisation des bombes nucléaires durant la seconde guerre mondiale, la catastrophe de Tchernobyl de 1987 et celle récente de Fukushima de 2011, les populations actuelles sont extrêmement méfiantes vis-à-vis des activités des centrales nucléaires et se posent de plus en plus de questions autour de la gestion des déchets nucléaires. Effectivement, le plus grand défaut du nucléaire est de produire des résidus radioactifs dangereux pour l'ensemble des espèces terrestres, et dont on ne connaît pas encore leur avenir. Comment gérer des déchets qui restent radioactifs jusqu'à des milliers d'années, tout en assurant la sécurité des générations futures ? Faut-il les stocker à long-terme, à court-terme, chercher à les éliminer en les rendant moins nocifs ? Depuis l'apparition du nucléaire, les politiques de gestion des déchets radioactifs ont énormément évolué temporellement mais évoluent également différemment selon les pays et leurs objectifs.

Ce rapport cherche dans un premier à rappeler la définition du déchet nucléaire et à comprendre les différentes catégories définies (valables mondialement). Ensuite, une partie historique retrace l'utilisation du nucléaire dans le monde et la gestion associée passée des déchets nucléaires afin d'en comprendre notre vision actuelle. Cette partie montre également comment notre connaissance du déchet radioactif a évolué et comment notre prise de conscience du danger propre à ces résidus s'est révélée malheureusement de part de multiples catastrophes à plus ou moins grande échelle. Enfin, le rapport vise à mettre en avant les différentes politiques mises en œuvre actuellement et les axes de recherche développés et techniques associées pour la gestion future des déchets nucléaires, en étudiant les pays les plus concernés par ce problème.

I. Définition, origine et classification du déchet radioactif

1. Qu'est-ce qu'un déchet ou une matière radioactive ?

Un déchet, c'est-à-dire une substance dont aucun usage n'est prévu ou envisagé, est qualifié de radioactif lorsqu'il présente un niveau de radioactivité ne permettant pas sa mise en décharge sans contrôle dans l'environnement.

Les utilisations de la radioactivité produisent aussi des matières radioactives. Il s'agit de substances possédant un certain niveau de radioactivité, pour lesquelles une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée, le cas échéant après traitement [1].

2. D'où proviennent les matières et déchets radioactifs ?

De nombreux secteurs sont amenés à utiliser les propriétés de la radioactivité dans leurs activités ou sont confrontés à sa présence. Les déchets radioactifs proviennent essentiellement (à environ 60%) de l'industrie électronucléaire qui comprend les centrales nucléaires de production d'électricité et les usines de fabrication et de traitement des combustibles nucléaires. Ce secteur inclut également les activités d'extraction et de traitement du minerai d'uranium, l'enrichissement des combustibles et enfin le 'recyclage' [2]. Chaque année, la production d'électricité d'origine nucléaire engendre 1 150 tonnes de déchets sous forme de combustibles usés [2]. Le démantèlement du parc électronucléaire français engendrerait également une forte augmentation de la quantité de déchets nucléaires (de faible activité).

Pour le reste, ils sont issus à environ 40% d'autres secteurs tels que la Défense Nationale (11%) ayant des activités liées à la force de dissuasion, à la propulsion nucléaire (certains navires sous-marins) et aux activités de recherche associées. Les déchets radioactifs se rencontrent également (à 26%) dans les universités ou les laboratoires de recherche de multiples domaines (nucléaire civil, physique des particules, agronomie, chimie, biologie, géologie, etc.). Certaines industries non nucléaires produisent aussi des déchets radioactifs (3%) de part leurs activités liées, par exemple, à l'extraction des terres rares, à la fabrication de pâte à papier ou d'engrais, la stérilisation du matériel médical, la conservation de produits alimentaires, le contrôle de soudures, etc. L'utilisation d'éléments radioactifs notamment dans les hôpitaux pour la recherche médicale, le diagnostic (traceurs isotopiques) ou encore traitement des patients (cancers) provoquent la création de relativement peu de déchets nucléaires (1%). La Figure 1 illustre la répartition par secteurs économiques des volumes¹ relatifs de déchets radioactifs existants en France [2].

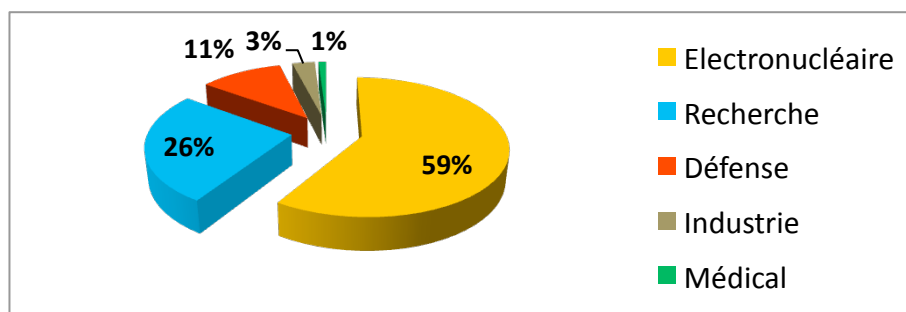


Figure 1: Répartition par secteurs économiques des pourcentages en volume de déchets radioactifs existants en France [2]

¹ Les quantités de déchets radioactifs sont évaluées en mètres cubes « équivalent conditionné », c'est-à-dire le volume du déchet une fois celui-ci conditionné.

3. Classification des déchets radioactifs

Les déchets radioactifs sont classés en plusieurs catégories, c'est à dire en ensembles de produits présentant des caractéristiques physico-chimiques analogues. En France, la classification des déchets repose sur deux paramètres :

- le niveau de radioactivité (intensité) et
- la période radioactive (ou 'demi-vie') des radionucléides présents dans les déchets.

Pour être plus exact, la période radioactive correspond au temps nécessaire pour que la moitié des atomes se désintègrent naturellement (ou durée pour laquelle l'activité² radioactive de l'isotope est divisée par deux). Cependant, attention au terme de 'demi-vie' qui laisse penser qu'au bout de 2 demi-vies, tous les atomes se seraient désintégrés (ou que l'activité serait nulle). Ce n'est pas le cas, il reste encore un quart (la moitié de la moitié) des atomes radioactifs initiaux (25% de l'activité initiale). Effectivement, la période radioactive ne dépend pas des conditions d'environnement, telles que la température ou la pression, mais uniquement de l'isotope³ considéré. Le nombre d'atomes d'un isotope radioactif qui se désintègrent naturellement suit une loi de décroissance exponentielle en temps (Figure 2).

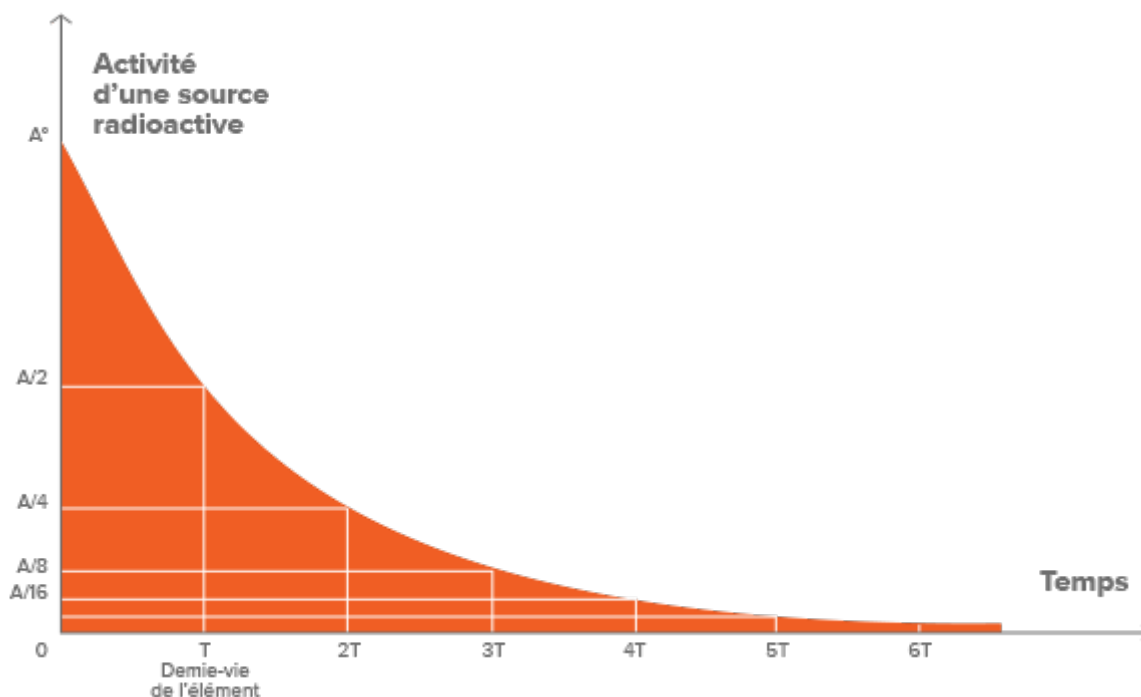


Figure 2: Loi de décroissance exponentielle de l'activité d'une source radioactive [12]

A titre d'exemples, le tritium (^3Tr) a une période d'environ 12 ans, le plutonium (^{239}Pl) de 24 000 ans, l'uranium (^{235}U) de 700 millions d'années et le thorium (^{232}Th) de 14 milliards d'années. Les échelles de temps sont donc extrêmement variables en fonction des isotopes.

² L'**activité** d'un déchet radioactif est la vitesse de désintégration du matériau qui le constitue. Elle correspond, à un instant donné, à un nombre de noyaux désintégrés en une seconde.

³ Les **isotopes** sont des atomes qui possèdent le même nombre de protons (et donc d'électrons pour rester neutre), mais un nombre différent de neutrons.

On distingue généralement quatre niveaux de radioactivité contre trois périodes radioactives qui permettent de définir cinq catégories de déchets radioactifs (Tableau 1).

	Vie très courte (VTC)	Vie courte (VC)	Vie longue (VL)
Très faible activité (TFA)	Déchets de très faible activité (TFA)		
Faible activité (FA)		Déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC)	Déchets de faible activité à vie longue (FA-VL)
Moyenne activité (MA)			Déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL)
Haute activité (HA)			Déchets de haute activité à vie longue (HA)

Tableau 1: Classification des déchets radioactifs en fonction de leur activité et leur période [2]

Un déchet radioactif est dit à vie très courte lorsque sa radioactivité est divisée par 2 en moins de 100 jours. Il est dit à vie courte quand sa radioactivité provient majoritairement de radionucléides ayant une période inférieure ou égale à 31 ans. Enfin, les déchets dits à vie longue contiennent une quantité importante de radionucléides dont la période est supérieure à 31 ans.

Il faut noter qu'il n'existe pas de critère de classement unique permettant de déterminer la catégorie d'un déchet : en complément de l'activité globale d'un déchet, il est nécessaire d'étudier la radioactivité de chacun des radionucléides présents dans le déchet. En outre, cette classification en fonction de la période radioactive et de l'activité, n'est pas suffisante pour déterminer précisément le mode de gestion approprié à un type particulier de déchet. Les caractéristiques physiques et chimiques des déchets, ainsi que leur origine, doivent également être prises en compte [2].

Néanmoins, nous donnerons quelques exemples [2] de déchets affiliés aux cinq catégories définies dans le Tableau 1 :

- (1) Les déchets TFA proviennent essentiellement du démantèlement des installations nucléaires ou classiques utilisant des matériaux nucléaires. Leur volume se verra nettement augmenter en France lors du démantèlement du parc électronucléaire. Ces déchets sont généralement sous forme de blocs de béton, de gravats, de terre, ou d'objets métalliques.
- (2) Les déchets FMA-VC regroupent essentiellement des vêtements, outils, filtres liés à la maintenance et au fonctionnement des installations nucléaires. Ils proviennent parfois aussi d'opérations d'assainissement et de démantèlement de ces installations.
- (3) Les déchets FA-VL concernent globalement les déchets radifères (qui contiennent des radionucléides naturels dont une quantité notable de radium et/ou de thorium) et de graphite. Les premiers sont issus d'opérations de recherche et de traitement chimique de minerais, ou encore d'assainissement de sites historiquement pollués au radium. Les deuxièmes sont principalement issus du démantèlement des premières centrales nucléaires.
- (4) Les déchets MA-VL proviennent majoritairement des structures entourant les combustibles usés ou des résidus issus du traitement des effluents et des équipements pour le fonctionnement des installations nucléaires.
- (5) Les déchets HA sont liés aux activités électronucléaires et rassemblent pour l'essentiel les résidus non valorisables issus du traitement des combustibles usés.

II. Histoire du déchet radioactif

1. Découverte de la radioactivité

La radioactivité est un phénomène présent sur l'ensemble de la Terre depuis sa formation. Cependant, elle n'a été découverte qu'en 1896, grâce au physicien français Henri Becquerel et à la contribution de Pierre et Marie Curie pour la mise en évidence de son importance. La radioactivité naturelle est alors définie comme l'émission de radiations par une substance inerte sans apport d'énergie extérieure 0.

Les découvertes autour de la radioactivité ouvrent un vaste champ de recherches. Les physiciens commencent à explorer le cœur de la matière : les atomes. En 1934, Irène et Frédéric Joliot-Curie créent artificiellement pour la première fois, des éléments radioactifs. L'homme est alors capable de maîtriser ce phénomène ouvrant la voie à une nouvelle ère scientifique et technique [4].

La radioactivité est devenue un sujet d'étude majeur grâce à ses propriétés permettant, actuellement, le traitement de tumeurs (applications médicales), la production d'électricité (implications énergétiques), la datation d'objets archéologiques (recherche et culture scientifique), ou encore la création d'armes de dissuasion (application militaire).

2. Industrialisation militaire du nucléaire et prise de conscience de la dangerosité des déchets radioactifs

a. Le site d'Hanford, aux Etats-Unis

L'histoire industrielle du nucléaire débute en 1942, en pleine seconde guerre mondiale, avec le projet Manhattan, projet militaire alors tenu secret. Le site de Hanford dans l'État de Washington aux États-Unis, a été l'un des deux lieux choisis à l'époque par l'administration Roosevelt pour développer l'arme nucléaire (avec celui de Oak Ridge, dans le Tennessee). Neuf réacteurs nucléaires et cinq usines de plutonium sont construites très rapidement afin de créer du plutonium pour alimenter les bombes nucléaires américaines. Hanford (Figure 3) était un site d'expérience dans un contexte de guerre, où les déchets radioactifs n'étaient pas leur préoccupation première. Le fleuve Columbia, l'un des plus grand fleuve de l'Ouest américain, était alors utilisé pour refroidir les réacteurs. L'eau usagée était ensuite directement reversée dans le fleuve avec une concentration élevée en particules radioactives.

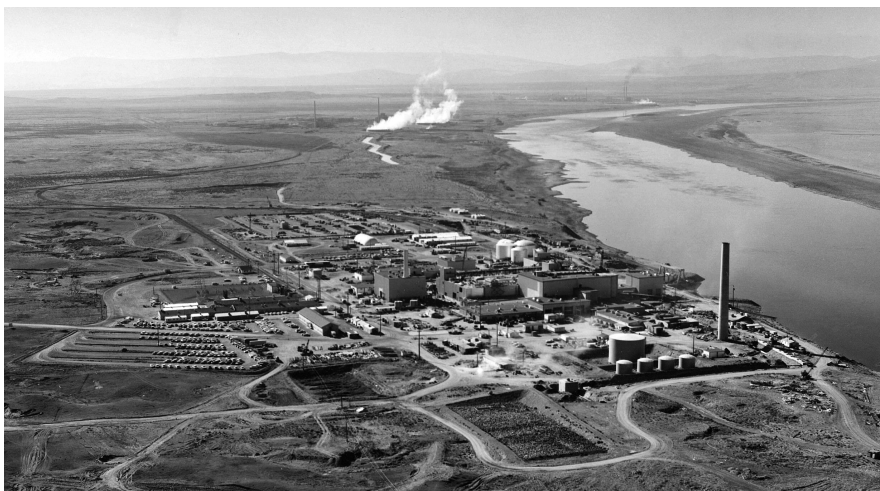


Figure 3: Site de Hanford sur la rive du fleuve Columbia

Dès 1943, pour stocker de façon provisoire les déchets radioactifs les plus dangereux, les ingénieurs de Hanford ont fait construire 170 énormes cuves de béton (Figure 4), qui ont été enfouies dans le sol, dont 149 ne possédant qu'une seule coque. Malheureusement, dans les années 1980, les ingénieurs se sont rendus compte que 60 cuves fuyaient, contaminant la nappe phréatique [5].



Figure 4: Cuves en béton servant de réservoirs à déchets radioactifs sur le site d'Hanford

b. Le complexe de Mayak, en Union Soviétique

Pour rattraper les américains dans la course aux armements, en 1945, l'Union Soviétique a fait construire une dizaine de sites atomiques. En 1957, une cuve de déchets radioactifs de très haute activité a explosé près de Mayak, à cause d'une panne du système de refroidissement. Des radioéléments ont été projetés dans l'atmosphère contaminant près de 15 000 km². On estime le nombre de personnes décédées sur le coup à plus de 200 et près de 270 000 personnes ont été exposées aux radiations. Cette catastrophe resta « secret défense » jusqu'en 1976 où les premières informations sur le sujet furent révélées [5]. Cet accident nucléaire, qui était le plus grave connu avant Tchernobyl, a montré que les déchets radioactifs n'étaient pas seulement polluants, mais aussi explosifs.

Depuis les débuts du complexe militaire de Mayak, les usines qui produisaient tout le plutonium de la guerre froide rejetaient leurs déchets liquides dans des lacs, transformés en réservoirs à ciel ouvert (Figure 5).



Figure 5: Site de Mayak et lac Karatchäi

Les radiations étaient telles pour le lac de Karatchaï que les responsables ont choisi de le reboucher, en immergeant des blocs de béton conçus pour piéger les sédiments du lac, avant de les recouvrir de gravier et de terre. Les autres lacs de stockage étaient plus grands et les liquides radioactifs étaient donc plus dilués. Cependant, ces lacs de déchets sont à la source de la rivière Tetcha, qui alimente de nombreux villages avant de se jeter dans le fleuve Ob, traversant la Sibérie jusqu'à la mer de Kara [6]. Les fonds et les berges de la rivière sont reconnus contaminés par les rejets radioactifs du complexe nucléaire. Aujourd'hui, on estime que la région touchée est toujours un réservoir de radioactivité, mais les zones critiques restent sous accès restreint ou sont clôturées. Près de 800 km² de territoire sont fermés [6].

3. Déchets nucléaires et incidents plus récents

Cette partie ne donne que des exemples non exhaustifs d'incidents ou accidents liés aux déchets nucléaires.

a. Contamination à West Valley (USA)

L'usine de retraitement des combustibles nucléaires usés de West Valley, près de New York, était unique aux USA. Elle a été le seul établissement privé pour le retraitement entre 1966 et 1975 et a également servi de site de stockage pour une grande variété de déchets radioactifs. Cependant, lorsque l'usine a cessé ses activités en 1975, elle a laissé derrière elle un véritable héritage de contamination radioactive. Effectivement, des réservoirs contenant 2 300 m³ de déchets hautement radioactifs ont été abandonnés sur place [7]. Des caisses et des fûts (Figure 6) de déchets de moindre activité, étaient stockés dans des tranchées exposés aux intempéries.



Figure 6: Caisses et fûts de déchets radioactifs empilées dans une zone d'élimination de West Valley. Noter l'accumulation d'eau sur le fond de la tranchée. [7]

L'eau a pu s'accumuler aux fonds des tranchées entraînant la création d'un panache d'eau radioactive souterraine qui a par la suite contaminé le lac Erié et le lac Ontario. Après des années de litiges, de retard, et des milliards de dollars de dépense fédérale, la vitrification des déchets de HA a été achevée en 2002. Ces déchets vitrifiés restent sur le site à l'heure actuelle en attente d'une destination finale. En ce qui concerne les problèmes des déchets de faibles activités, du retraitement du site, et de la décontamination du sous-sol, une quarantaine d'années est encore nécessaire pour les résoudre [7]. Plus de trente ans après l'arrêt des activités de retraitement, la contamination de West Valley reste donc significative.

b. Incendie dans l'usine de retraitement de La Hague (France)

En 1981, un incendie s'est déclaré dans un silo d'entreposage de déchets solides de l'usine de retraitement de La Hague (France). Effectivement, ce silo contenait près de 520 tonnes de déchets dont certains sont pyrophoriques, c'est-à-dire qu'ils ont la propriété de s'enflammer spontanément à température ambiante au contact de l'oxygène [8]. Avec l'incendie, l'exploitant (AREVA) a été contraint de noyer les déchets dans l'eau, alors que l'enceinte du silo était construite en béton armé, conçue pour un entreposage à sec.

L'incident n'a eu pour conséquence qu'une contamination surfacique localisée près du stockage [9]. Cependant, en cas de rupture de son unique barrière de confinement ou par fuite, le silo aurait pu provoquer une contamination radioactive de l'environnement. L'étanchéité du silo rempli d'eau est aujourd'hui assurée au moyen d'une barrière de confinement recouverte d'une « peau » en acier.

c. Incident de Sellafield, anciennement Windscale (Angleterre)

En 2005, une fuite de combustibles liquéfiés fortement radioactifs a été décelée à l'usine de retraitement des combustibles nucléaires usagés et d'entreposage de déchets hautement radioactifs, implantée à Sellafield, en Grande-Bretagne. Au total, environ 83 000 litres de liquides contenant environ 22 tonnes de combustible nucléaire (principalement de l'uranium incorporant environ 160 kg de plutonium) dissous dans de l'acide nitrique, se sont échappés d'une fissure dans une canalisation. Les fluides se sont répandus dans une cuve dans l'enceinte de l'usine pendant près de 8 mois de façon inconnue. Les raisons de la longue invisibilité de la fuite sont des défaillances à la fois humaines et organisationnelles :

- un défaut de vérification de l'équipement de détection des fuites,
- un non respect des instructions clés d'exploitation.
- insuffisance des modalités de suivi et de contrôle de gestion [10].

A la suite de la découverte de la fuite, l'usine de retraitement a été fermée pendant 2 ans. Les réparations et travaux de remise en conformité ont été suivis par l'autorité de sûreté britannique (HSE : Health Safety Executive), qui a finalement donné son autorisation à la reprise des activités de l'usine en 2007, assortie d'un certain nombre de recommandations [10].

Le problème des déchets nucléaires touche toujours aujourd'hui bien des pays : le Japon, l'Angleterre, les Etats-Unis, la Russie, la France, etc. Comment les gérer en évitant tout risque à la fois pour les populations actuelles et les générations futures ?

III. Les politiques de gestion et de traitement des déchets nucléaires

1. Les rejets radioactifs et normes associées

Le développement de l'utilisation de l'énergie nucléaire à partir des années 40 a entraîné une forte augmentation des volumes de résidus solides et liquides produits par les réacteurs nucléaires. Dès lors, s'est posé le problème de l'élimination de ces déchets. Les hommes ont par conséquent commencé à utiliser la mer comme élément diluant et l'air comme gaz diluant pour la fumée de leurs usines.

a. L'immersion des déchets radioactifs

En raison de son étendue considérable et de son immense volume, la mer a pu paraître un milieu tout indiqué pour l'élimination des déchets radioactifs. Ceux qui ont fait l'objet d'immersions se présentent sous plusieurs formes :

- des déchets liquides, directement évacués en mer sur des sites dédiés ou mis en conteneurs, mais non solidifiés.
- des déchets solides non conditionnés ou, pour la plupart, emballés, généralement dans des fûts métalliques et après incorporation dans une matrice de béton ou de bitume conformément aux recommandations de l'AIEA.
- des éléments d'installations nucléaires, comme des cuves de réacteurs nucléaires, contenant éventuellement du combustible, provenant des États-Unis ou de l'ex-Union soviétique.

L'activité totale des déchets immergés était d'environ 85 000 téra-becquerels⁴ à la date de leur immersion et la carte de la Figure 7 recense les différents sites utilisés.

Entre 1946 et 1959, les États-Unis ont rejetés volontairement près de 27 000 fûts de déchets dans le Pacifique et 23 000 dans l'Atlantique [11], qui correspondent à une somme radioactive d'environ 3 500 TBq. L'URSS a également déversé des quantités colossales de déchets (38 370 TBq) à la fois sous forme de rejets liquide et solide, dans l'Océan glacial Arctique, entre 1960 et 1991 [1].

Au sein de l'Union Européenne, huit pays ont immergés des fûts en Atlantique Nord-est sous l'égide de l'OCDE : l'Allemagne, la Belgique, la France, l'Italie, les Pays-Bas, le Royaume-Uni, la Suisse et la Suède. D'un point de vue mondial, les européens sont les plus grands déverseurs déchets radioactifs en pleine mer avec plus 42 000 TBq. Les Britanniques ont à eux-seuls rejeté plus de 80% du total des immersions volontaires européennes, la Suisse arrivant seconde au palmarès [12] (Figure 8).

⁴ Le **Becquerel** est une unité de mesure de l'activité physique d'une source radioactive. Elle correspond au nombre de désintégrations émises chaque seconde par la source. On utilise plus souvent le téra-becquerel (TBq) qui vaut mille milliards de becquerels.

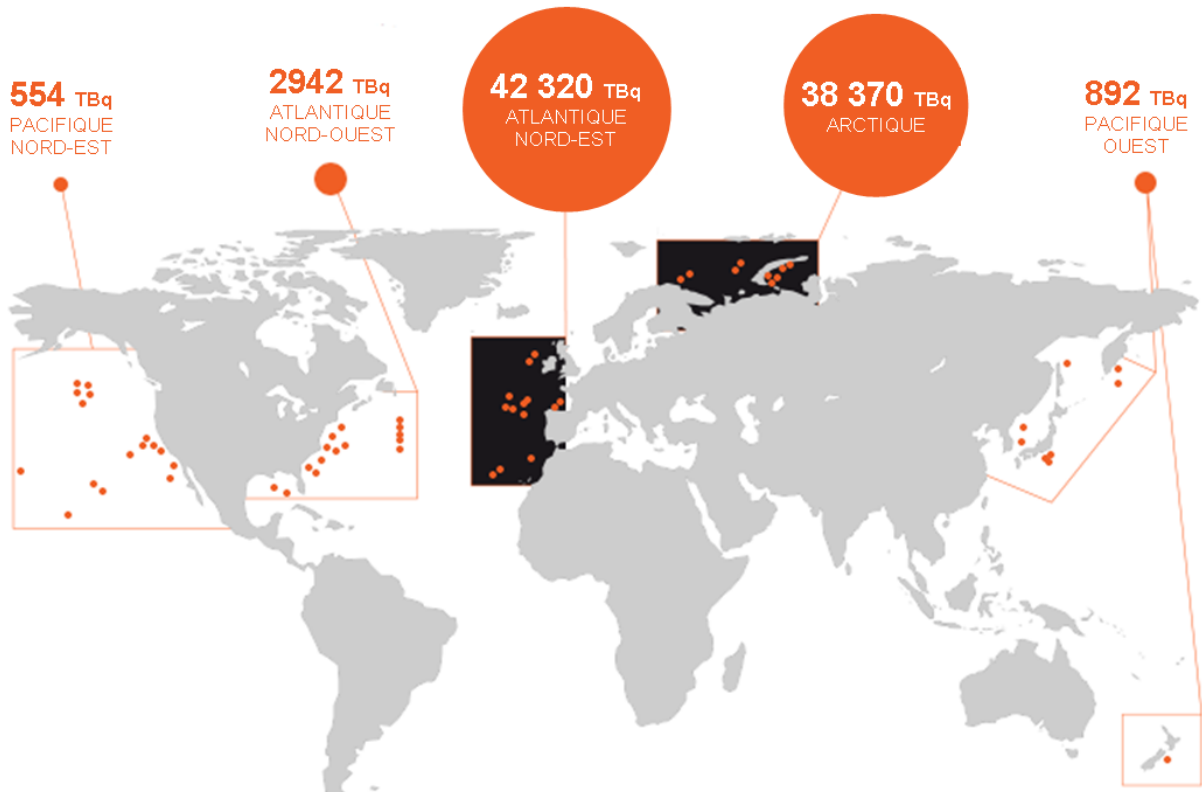


Figure 7: Cartographie des rejets maritimes volontaires dans le monde en Tera-becquerels.
Sources: Chiffres [1], Carte [12]

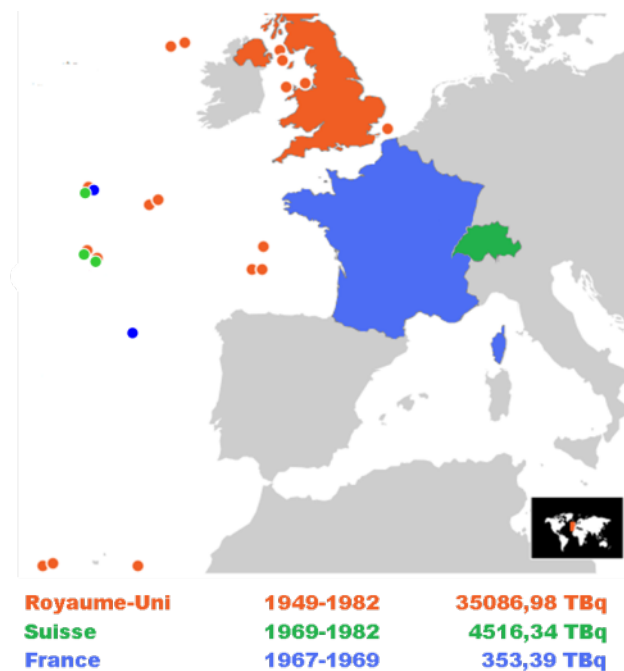


Figure 8: Cartographie des rejets maritimes volontaires du Royaume-Uni, de la Suisse et de la France en Atlantique Nord-Ouest. Sources: Chiffres AIEA, Carte [12]

Le rejet en mer de différents produits de fission tendait donc à se généraliser à l'ensemble des pays nucléarisés et à prendre des proportions de plus en plus importantes. D'un point de vue juridique, aucune règle internationale n'interdisait l'immersion de ces déchets durant l'après guerre, malgré les

protestations de certains Etats [13]. Des obligations de coopération ont été mises à la charge des Etats. Une procédure de contrôle des rejets à la mer en 1960 a vu le jour mais cela n'arrêta en rien la poursuite des déversements volontaires en mer. La Convention de Londres de 1972, reconnue comme le principal dispositif international de contrôle de l'immersion de déchets dans la mer, a interdit, dès son entrée en vigueur en 1975, l'immersion de déchets fortement radioactifs et a exigé une autorisation spéciale pour immerger les déchets faiblement radioactifs [1].

Après des années de pollution radioactive des océans, ce n'est qu'en 1993 qu'un traité des Nations-Unis interdit définitivement l'immersion de tous déchets nucléaires dans la mer, en précisant toutefois que cette décision ne se fondait pas sur des considérations scientifiques et techniques, mais plutôt sur des critères moraux, sociaux et politiques [1]. En revanche, les rejets fluides par conduits terrestres ne sont pas concernés par ce traité.

Les rejets fluides par conduits terrestres et les rejets gazeux par les installations nucléaires et usines électronucléaires

Une faible partie des déchets radioactifs des usines nucléaires de retraitement des combustibles se retrouve sous forme liquide ou gazeuse. Au cours des opérations de retraitement, de multiples barrières sont mises en place pour empêcher la migration des éléments radioactifs dans la biosphère. Malgré les précautions prises, ces barrières ne sont jamais parfaitement étanches : des effluents⁵ de faible et moyenne activité sont rejetés en petite quantité dans la mer ou l'atmosphère. Contrairement aux déchets solides qui sont conditionnés, concentrés et immobilisés, la réduction de la nocivité de ces rejets est obtenue grâce à une grande dilution.

Les installations nucléaires rejettent en quantités significatives trois éléments radioactifs : le krypton 85^6 , le tritium⁷ et le carbone 14^8 . Tous les autres radioéléments rejetés sont considérés comme ayant une incidence marginale par rapport à ces derniers, d'après la Société Française d'Energie Nucléaire (SFEN) [14].

En France, les rejets actuels de ces trois composés proviennent essentiellement de l'usine de retraitement de combustible nucléaire de la Hague (mais aussi du centre CEA de Valduc et des Centres Nucléaires de Production d'Electricité, CNPE, d'EDF). Depuis son entrée en activité en 1966, elle a commencé à produire chaque jour environ 50 m^3 de déchets liquides radioactifs qui ont été évacués dans la Manche par un pipe-line s'avancant de 2 km dans la mer, après avoir été fortement dilués dans l'eau. De plus, la concentration en krypton dans l'hémisphère Nord ne cesse d'augmenter depuis les

⁵ Un **effluent** est une substance liquide ou gazeuse, produite par installation, qui est destinée à l'abandon et qui a vocation à être éliminée par dispersion dans l'environnement à partir du site de production ou à proximité immédiate.

⁶ Le **krypton 85** est un gaz rare de 10,7 ans de période. C'est un produit de fission qui est retenu dans l'élément combustible et qui est libéré sous forme gazeuse à l'occasion du retraitement du combustible usagé. Il est déchargé de façon contrôlée dans l'atmosphère.

⁷ Le **tritium** est un isotope radioactif de l'hydrogène d'une période de 12,3 ans. On le retrouve dans les effluents sous forme d'eau tritiée et de gaz. L'eau tritiée est rejetée de façon contrôlée dans les fleuves ou les courants marins, car se dilue très aisément dans l'eau naturelle

⁸ Le **carbone 14** a une période de 5730 ans. Il est formé dans les réacteurs par réactions de neutrons sur l'azote et l'oxygène contenus dans les combustibles. Contrairement aux deux éléments précédents, le carbone 14 peut facilement se combiner avec des matières organiques. Les conditions de son rejet doivent donc être très précisément contrôlées et limitées.

années 60 à cause des rejets des installations de retraitement européennes qui sont tolérés. Ces « autorisations » contrôlées des rejets sont tolérées du fait, que ces éléments radioactifs sont très difficilement piégeables. Il serait alors extrêmement coûteux de les récupérer. Le tritium, à l'heure actuelle, ne peut être éliminé ou retenu sur les filtres. Il est alors rejeté en totalité dans l'environnement, dont une très grande partie a été au préalable piégée sous forme d'eau tritiée⁹. Le carbone 14 est absorbé en petite partie dans des solutions avant d'être rejeté, dilué dans des eaux tritiées [14]. En 2006, les émissions de l'ensemble du parc électronucléaire français ont été de 10,9 TBq de carbone 14 (dont 93% de rejets gazeux) et de 1068 TBq de tritium (dont 97% de rejets liquides). L'usine de retraitement de la Hague émet environ deux fois plus de carbone 14 et dix fois plus de tritium que l'ensemble des CNPE [15]. Le krypton 85 est, quant à lui, entièrement libéré sous sa forme gazeuse et ne subit aucun traitement particulier du fait de son faible impact radiologique.

Que ce soit pour les effluents liquides ou gazeux, en France, les usines ont l'autorisation de les rejeter une partie dans l'environnement. Ces rejets ne sont pas considérés comme dangereux par les entreprises nucléaires puisqu'ils sont en dessous des normes sanitaires fixées par des organisations internationales indépendantes : la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des Effets des Radiations ionisantes (UNSCEAR en anglais) ou encore, l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA). Nous pouvons alors nous demander si les normes françaises sont pertinentes ? D'après certains spécialistes de la CRIIRAD (Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la RADioactivité), la réponse est non [5] car l'établissement des normes sanitaires se fonde sur des modèles établis à partir de l'exemple de Nagasaki et Hiroshima. Or il s'agit de bombes nucléaires, qui correspondent donc à des radiations intenses mais externes et brèves, alors que les effets des rejets liquides ou atmosphériques des installations nucléaires correspondent à des contaminations internes, chroniques, à très faible niveau. L'environnement ou le corps humain ne vont donc pas réagir de la même manière à ces deux types d'effets et les modèles extrapolés et appliqués pour l'étude des risques sanitaires ne sont pas réellement pertinents.

Néanmoins, les normes fixées sur le rejet d'effluents sont basées sur deux types d'approche :

- l'approche sanitaire que nous venons d'entrevoir,
- l'approche technologique.

Le critère le plus important est bien sûr celui de la santé des populations. La Directive européenne 96/29/EURATOM du 13 mai 1996 fixe les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants [16]. Elle prend en compte les recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), qui fixe des limites de dose en Sievert¹⁰ :

- 1 mSv/an pour le public,
- 100 mSv sur cinq ans pour les travailleurs, sans jamais dépasser 50 mSv sur une année.

⁹ L'**eau tritiée** est une forme d'eau dont une partie ou tous les atomes d'hydrogène ont été remplacés par du tritium.

¹⁰ Le **Sievert** est l'unité utilisée pour donner une évaluation de l'impact des rayonnements sur le corps humain. Elle mesure le dégât biologique sur les tissus vivants irradiés. Comme point de repère, la dose efficace, c'est à dire la dose absorbé par le corps humain (énergie par unité de masse), de la radioactivité naturelle est de 2,4 mSv (moyenne annuelle mondiale).

En tant que directive, elle impose des obligations de résultat à chaque état membre. De plus, elle n'empêche pas les efforts de minimisation des rejets observés auprès des installations nucléaires. En France, les rejets effectifs tendent à être maintenus les plus faibles possibles, en deçà des normes, en utilisant le savoir technologique disponible à notre époque. « En tout état de cause, l'arrêté d'autorisation fixe les limites de rejet sur la base de l'emploi des meilleures technologies disponibles à un coût économiquement acceptable et des caractéristiques particulières de l'environnement du site » (Article 15 de l'arrêté du 26 novembre 1999).

b. Les rejets accidentels majeurs

Outre les normes sur les rejets radioactifs volontaires, soumis à déclaration et/ou autorisation, un certain nombre de rejets ont été accidentels. Les deux exemples présentés ci-après ne sont pas exhaustifs.

Tchernobyl, Ukraine (1986)

La catastrophe de Tchernobyl de 1986 est présente dans tous les esprits (Figure 9). Elle a entièrement modifié la façon dont le public perçoit les risques nucléaires.

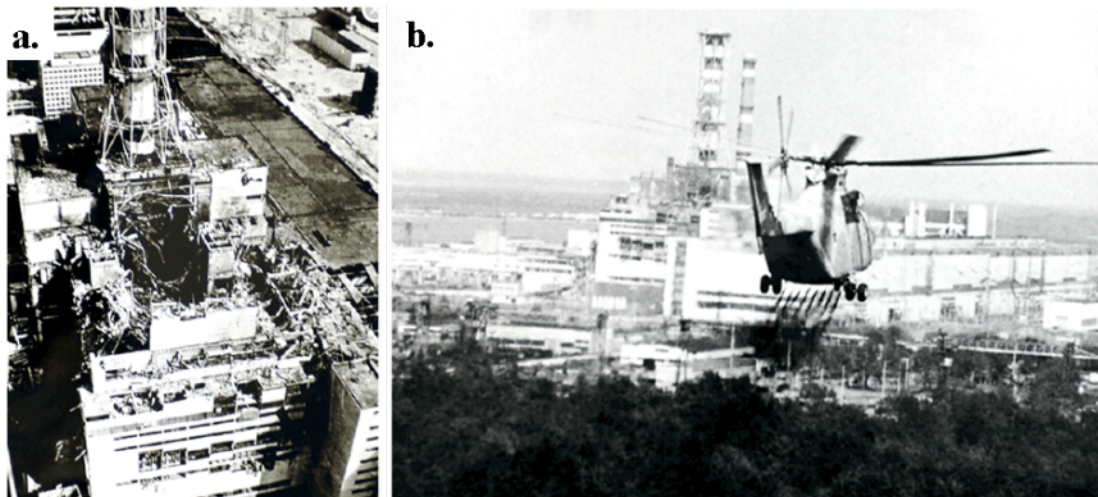


Figure 9: Centrale de Tchernobyl après la catastrophe du 26 avril 1986 (a.) et l'intervention des secours (b.). Source: AIEA.

Cet accident a eu lieu lors de la préparation d'un exercice de sûreté sur le réacteur n°4, qui devait tester le fonctionnement d'un nouveau système de refroidissement de secours. Des déficiences techniques et erreurs humaines ont entraîné une augmentation incontrôlée de la puissance du réacteur conduisant à un réchauffement brutal de l'eau qui s'est vaporisée dans le cœur du réacteur. Une explosion de vapeur s'est alors produite, à l'intérieur du bâtiment, détruisant quasi-totalement le réacteur et provoquant un incendie de graphite.

Diverses matières radioactives ont été rejetées dans l'atmosphère : du gaz, des aérosols et des particules de combustible nucléaire finement fragmentées. Ce rejet a été extrêmement important du point de vue quantitatif, mettant en jeu une fraction notable des produits radioactifs présents dans le réacteur. Sa durée a été étonnamment longue (une dizaine de jours) et son altitude atteinte élevée (1 000 m environ). Ces caractéristiques étaient pour une grande part imputables au feu de graphite, difficile à éteindre. Vu les fréquents changements météorologiques pendant la période de rejet, la zone touchée par le panache radioactif et par le dépôt consécutif de substances radioactives sur le sol a été

extrêmement étendue, englobant tout l'hémisphère nord. Cependant, seule une partie de l'Europe a subi une contamination importante.

Plus de 100 000 personnes ont été évacuées, principalement de la zone de 30 km de rayon autour du site du réacteur. Ces personnes ont reçu des doses d'irradiation élevées allant de 70 mSv chez les adultes à environ 1 000 mSv chez les jeunes enfants au niveau de la thyroïde, avant l'évacuation. Des centaines de milliers de travailleurs (environ 600 000) ont participé aux interventions d'urgence sur le site pendant l'accident, puis aux opérations ultérieures d'assainissement qui ont duré quelques années. Ces travailleurs ont été dénommés « liquidateurs ». Un nombre restreint d'entre eux ont reçu des doses très élevées (comprises entre quelques dizaines et quelques centaines de millisieverts), malgré les contrôles et limitations de doses mis en place.

Près de 270 000 personnes de l'ex-URSS habitent toujours dans des zones contaminées et où l'application de mesures de radioprotection continue d'être nécessaire. Les matières radioactives en suspension et volatiles qui ont été libérées, se sont disséminées dans tout l'hémisphère nord. Les doses reçues par les populations à l'extérieur de l'ex-URSS sont relativement faibles et très variables d'un pays à l'autre, en fonction notamment des précipitations qui se sont ou non produites [17].

Fukushima suite au tsunami de Tohoku, Japon (2011)

Le 11 mars 2011, un séisme de magnitude 9 survient à 80 km au large des côtes de l'île de Honshu, déclenchant un tsunami qui dévaste le site de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi. Ces événements naturels ont entraîné la perte de refroidissement des cœurs des réacteurs et de plusieurs piscines d'entreposage de combustibles usés. Les cœurs de trois réacteurs entrent en fusion, tandis que des explosions, provoquées par la production d'hydrogène lors de la dégradation des combustibles, endommagent les bâtiments des réacteurs 1 à 3.

Des rejets massifs dans l'environnement de substances radioactives ont eu lieu après l'accident, et de manière plus modérée mais persistante, pendant plusieurs semaines :

- dans l'atmosphère, sous forme de gaz ou de très fines particules radioactives dispersées dans l'air (aérosols), dont une partie est retombée sur les surfaces au sol au Japon pour former des dépôts radioactifs persistants (Figure 10),
- dans le milieu marin, directement sous forme de rejets liquides en mer (Figure 11) et indirectement du fait des retombées sur la surface de la mer d'une partie des aérosols radioactifs dispersés au-dessus de l'océan [18].

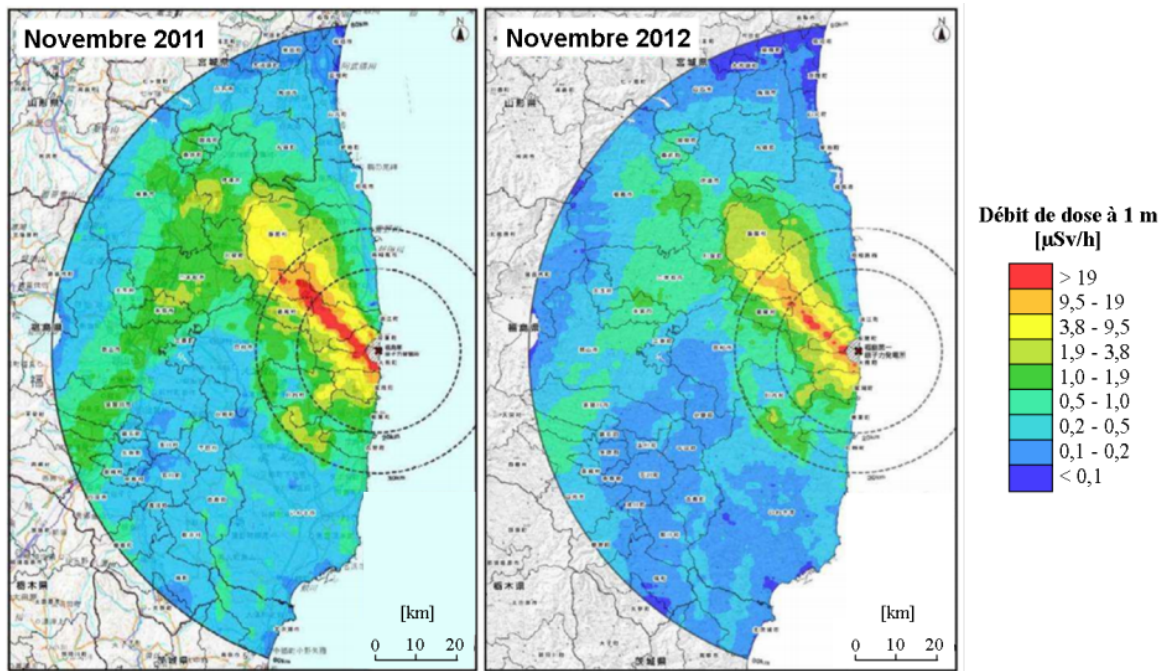


Figure 10: Comparaison des cartographies du débit de dose à 1 m au-dessus du sol en novembre 2011 et en novembre 2012 au Japon [18]

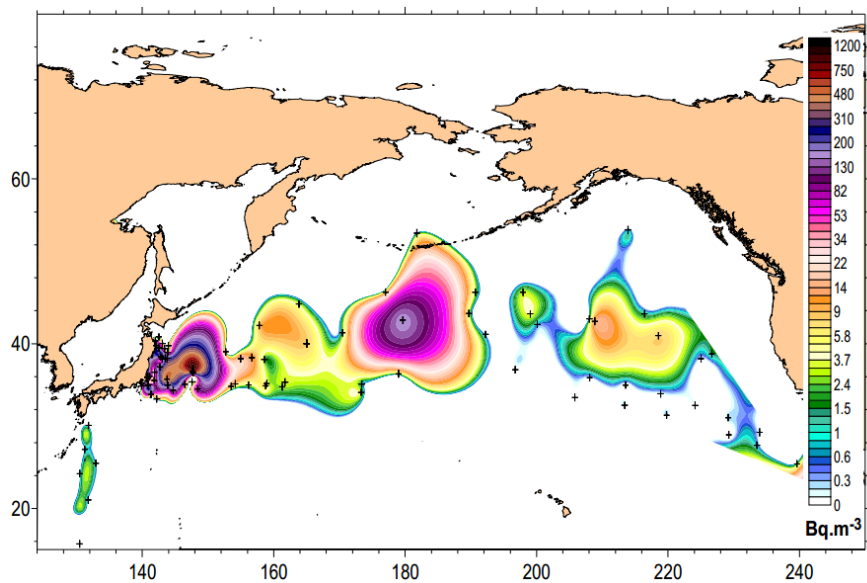


Figure 11: Concentrations en ^{134}Cs mesurées dans les eaux de surface du Pacifique du 31 mars au 17 mai 2011 (d'après Aoyama et al., 2012) [18].

2. Les solutions de gestion des déchets existantes

On constate que 90 % du volume total¹¹ des déchets radioactifs sont aujourd'hui constitués de déchets à très faible activité (TFA), et des déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC). Ils ne demandent donc 'que' des mesures de protection assez limitées. Pour les trois catégories

¹¹ Les quantités de déchets radioactifs sont évaluées en mètres cubes « équivalent conditionné », c'est-à-dire le volume du déchet une fois celui-ci conditionné.

de déchets restantes (déchets FA-VL, MA-VL et HA) représentant environ 10 %, des mesures de radioprotection plus substantielles sont nécessaires [1]. La Figure 12 représente la répartition du volume et du niveau de radioactivité des déchets radioactifs. Cela nous amène à séparer les solutions de gestion à court terme et celles à long terme.

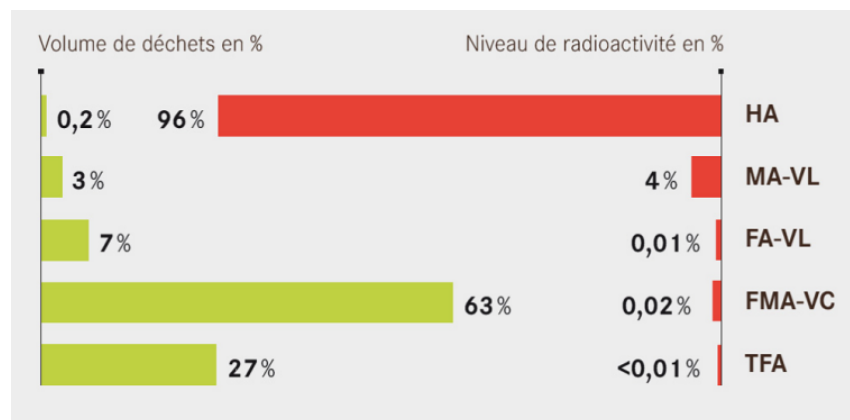


Figure 12: Répartition du volume et du niveau de radioactivité des déchets radioactifs [2]

a. A court terme

Après trois à quatre cycles d'utilisation, les assemblages de combustible utilisés dans les centrales nucléaires sont déchargés du réacteur et entreposés pendant un à deux ans dans une piscine de désactivation du combustible. Il devient alors un combustible usé considéré comme un déchet radioactif. Ce délai permet la baisse de la radioactivité des assemblages et leur refroidissement, afin d'en faciliter le transport vers une usine de traitement par exemple.

Les usines de retraitement des déchets radioactifs

Plusieurs pays dans le monde ont opté pour cette pratique de retraitement des déchets qui reste discutable : la France, l'Angleterre, le Japon, la Chine, l'Inde, la Russie.

Les éléments combustibles radioactifs usagés sont déchargés dans une usine de retraitement à l'aide d'un robot. Après le déchargement, ils sont entreposés durant une petite dizaine d'années dans des piscines afin que leur niveau de radioactivité et leur température continuent de diminuer.

Les piscines de l'usine de retraitement de La Hague, en France, sont remplies à 9 m d'eau de hauteur dont 4 m d'eau sont au-dessus des paniers contenant les déchets. Cette hauteur permet d'être protégé du rayonnement radioactif. Après cette période d'entreposage, les crayons de combustible usés sont cisailés en petits morceaux et dissous dans des solutions acides. Cette technique permet de séparer les différentes matières présentes dans les barres combustibles. Il reste à la fin de ce procédé 95% d'uranium, 1% de plutonium et 4% de déchets ultimes¹² (Figure 13) [2]. La radioactivité est concentrée à 99% dans ces déchets ultimes [5]. Les principaux radionucléides (liste non exhaustive) contribuant à cette activité sont :

- pour les radionucléides alpha : curium 244 et américium 241,
- pour les radionucléides bêta-gamma : césium 137, strontium 90, prométhium 147, etc.

¹² Un **déchet ultime** est défini selon la réglementation française (article L 541-1 du Code de l'Environnement) comme un « Déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. »



Figure 13: Composition des combustibles usés [2]

Dans l'attente d'une solution définitive, les déchets ultimes issus du traitement du combustible usé sont vitrifiés et entreposés dans des puits ventilés, où ils poursuivent leur refroidissement et leur décroissance radioactive. Un réacteur qui produit en moyenne 20 tonnes de combustibles usés va produire entre 15 et 20 conteneurs de verre. Chaque année 1 400 tonnes de combustibles provenant des 58 centrales françaises et de certains pays étrangers arrivent à La Hague par train et par route [5]. Donc le volume de déchets hautement radioactifs est relativement faible, mais ces déchets resteront actifs pendant plusieurs centaines de millions d'années.

Le MOX et l'uranium de retraitement

Le pourcentage de plutonium restant (1 %) à l'issue du retraitement des combustibles usés contient énormément d'énergie et est réutilisable. Il peut être mélangé à de l'uranium appauvri, servant de matrice support, pour constituer alors un nouveau combustible, appelé MOX (*mixed oxyde*). Environ 120 tonnes de MOX sont produites par an en France [2]. L'utilisation du MOX permet d'économiser les ressources en uranium naturel, puisque 120 tonnes de MOX permettent de remplacer environ 120 tonnes d'uranium naturel (soit 1 000 tonnes de réserve de minerai) [1]. Ce combustible alimente en partie une vingtaine de centrales en France.

En France, l'uranium issu du traitement des combustibles usés, i.e. l'uranium de retraitement (URT) est entreposé temporairement sur le site de Pierrelatte. Il est ensuite envoyé suivant la demande des clients étrangers dans les installations en Europe ou en Russie pour subir un nouveau traitement d'enrichissement et pouvoir être réutilisé. L'URT est recyclé à hauteur de 74 tonnes/an sous forme d'assemblages URE (Uranium de Retraitement Enrichi) [2]. La France ne réalise pas cette étape d'enrichissement car ne possède pas les techniques nécessaires à ce genre d'opérations. Ce procédé permet de produire du nouveau combustible pour les centrales. La Figure 14 retrace l'ensemble du « cycle » de vie du combustible usé, depuis sa création à sa valorisation.

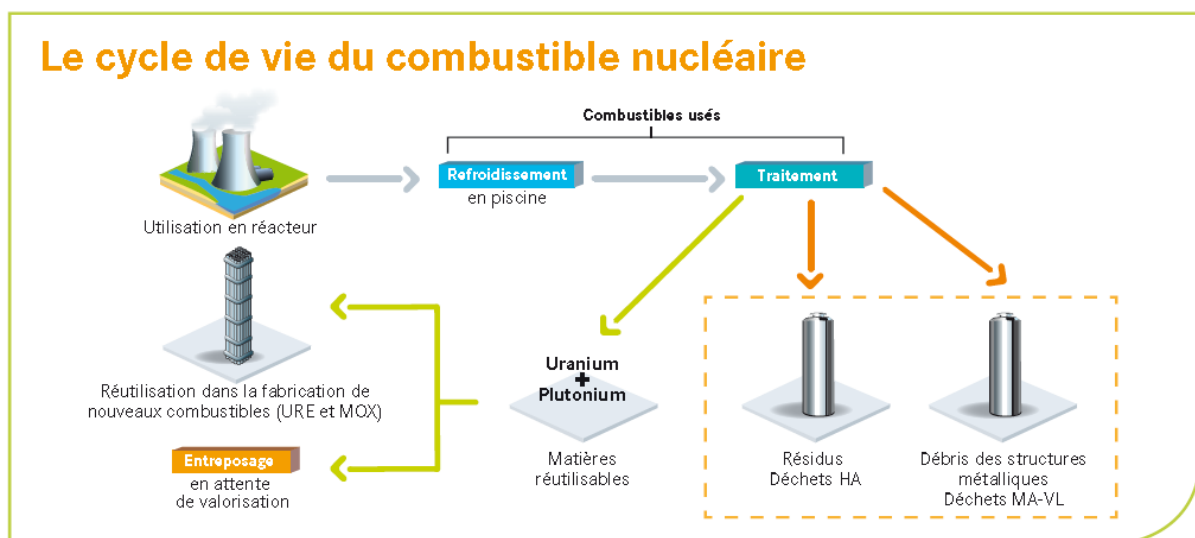


Figure 14: "Cycle" de vie et de traitement du combustible usé [2]

Depuis les années 1990, plusieurs centaines de tonnes d'URT français rejoignent Tomsk, une ville de Sibérie après 8000 km de transport. Cet uranium est transformé et le nouveau combustible est renvoyé en France. Cependant, environ 90% de l'uranium appauvri reste en Russie et y est stocké en tant que déchets peu radioactifs. Finalement, seulement 10% de l'URT sont réellement recyclés.

De plus, les usines de retraitement sont responsables de 80% des rejets radioactifs en Europe, alors pourquoi retraiter les déchets ? Nous avons vu que seulement six pays dans le monde, dont la France, ont opté pour cette pratique. Les autres pays n'ont pas pour autant réglé le problème des déchets nucléaires.

Stockage à proximité des centrales nucléaires

Aux Etats-Unis, les barres de combustibles irradiées sont directement placées dans des conteneurs renforcés et stockés autour des centrales nucléaires. Cette pratique est pour de nombreux scientifiques la meilleure à l'heure actuelle car évite les manipulations et les transports des déchets, qui peuvent représenter un risque supplémentaire [5].

Les piscines de refroidissement

La pratique la plus simple et la moins coûteuse reste de laisser les barres de combustibles dans des piscines de refroidissement en attente de solutions à long terme. Cependant, l'entreposage des déchets radioactifs dans des piscines de refroidissement ont été reconnus par l'Allemagne et la Suisse comme un risque inacceptable à cause du danger de crashes aériens ou d'actes de terrorisme. L'idée de la France en cas d'attaque de ses piscines de refroidissement est d'utiliser les canons anti-aériens. Ce dispositif n'est par exemple pas disponible aux Etats-Unis pour ses déchets radioactifs [5].

Zones de stockage à sec

L'Allemagne, quant à elle, place ses déchets dans des lieux de stockage à sec. Des conteneurs en béton sont placés dans les flancs des collines ou bien les déchets sont stockés dans des bâtiments en béton très épais afin d'éviter la destruction du lieu ou la propagation des déchets en cas de crash d'un avion [5].

L'Allemagne, l'Italie ou la Suisse ont invoqué de grands débats démocratiques qui ont abouti à la sortie du nucléaire. La décision de l'Allemagne de sortir du nucléaire ne résout pas pour autant le problème des déchets. Des quantités de combustibles irradiés ont été envoyées en France pour y être retraités mais les allemands doivent aujourd'hui récupérer les résidus du retraitement, des déchets vitrifiés de très haute activité. Quelles sont les solutions à venir pour ces déchets à vie longue ?

b. A long terme

Que ce soient les combustibles usés ou les déchets ultimes issus de leur traitement, les déchets nucléaires présentent des risques importants à la fois pour l'homme et l'environnement. Une partie perdurera pendant des milliers de siècles en raison de leur très longue durée de vie. Un conditionnement approprié à long terme est donc nécessaire pour assurer la protection des populations et réduire les risques de contamination ou de pollution.

Le stockage de ces déchets dans des formations géologiques profondes représente la solution définitive privilégiée par la plupart des pays ayant engagé un programme nucléaire [1].

Le stockage en couche géologique profonde

Le principe de ce type de stockage consiste à placer les déchets dans une couche géologiquement stable (c'est-à-dire sans risques sismique, volcanique et sans risque d'affaissement ou de soulèvement), de préférence très peu perméable de sorte qu'elle constitue à elle seule, une barrière efficace sur de très longues durées. Les couches géologiques les plus appropriées pour un stockage en profondeur sont, selon les accords internationaux, le granite, l'argile ou le sel. En enfouissant les déchets à des profondeurs significatives (plusieurs centaines de mètres), les perturbations surfaciques et les changements climatiques n'affecteront pas la zone de stockage et les risques d'intrusion humaine seront fortement réduits.

Plusieurs pays adoptent des politiques tournées vers le stockage définitif des déchets HA. Ces pays se trouvent néanmoins à des stades très différents du processus de sélection du site et de construction de leurs futures installations. Nous allons voir synthétiquement le cas de l'Allemagne, des USA, de la France, de la Finlande et de la Suède.

- **L'Allemagne**

En 1977, le gouvernement allemand décide de créer un centre national de gestion des déchets radioactifs incluant des installations pour le stockage provisoire, de retraitement et de stockage définitif. Ils choisissent finalement le site de Gorleben, qui était une mine de sel avec des galeries à plus de 800 m de profondeur. Un choix qui se veut surtout politique, car les scientifiques prévoient également plusieurs autres sites potentiels. Rapidement, une étude signale des risques géologiques incompatibles avec les impératifs de sécurité à long terme [5]. Des manifestations massives ont lieu et après quelques dizaines d'années d'étude de la mine, en 2000, un oratoire suspend l'exploration du site pendant 10 ans. En 2010, les activités sont relancées. Des études mécanique et thermique sur le sel de la mine ne montrent pour le moment aucune incompatibilité de la roche pour le stockage des déchets radioactifs. L'exploration se poursuit en creusant de multiples galeries dans toutes les directions afin de repérer si des couches contiennent de l'eau ou du gaz. La conformité de Gorleben avec les normes internationales de sûreté les plus récentes doit notamment être examinée par un groupe d'experts internationaux dans le courant de l'année 2013 [1].

Gorleben n'aurait, en fin de compte, peut-être pas dû être choisi pour un éventuel site de stockage définitif. En effet, une explosion de gaz a eu lieu à quelques km du site en 1969, et tenue sous silence longtemps, car dans l'ex-Allemagne de l'Est. Une étude confidentielle montre la présence de gaz dans l'ensemble des dépôts de sel, ce qui pourrait créer des problèmes de pression et compromettre la sécurité du site [5].

- **Les Etats-Unis**

Le site de Yucca Mountain, aux USA, avait été retenu en 2002 pour le stockage à long terme des combustibles usés. La direction de la gestion des déchets radioactifs civils du ministère de l'Énergie (*DOE : Department of Energy*) avait déposé une demande d'autorisation de construction en 2008. Le dossier ayant été jugé conforme, son instruction a été acceptée par l'autorité de sûreté (*Nuclear Regulatory Commission*). Mais, devant la difficulté de faire émerger un consensus bipartisan, l'administration Obama a estimé que le site Yucca Mountain ne constituait plus une option satisfaisante sur le long terme. En 2009, la phase de préparation du stockage n'a donc plus été financée et l'instruction de la demande d'autorisation de création a été suspendue [1]. Les études et recherches sur le stockage géologique profond viennent tout juste de redémarrer. Le DOE a annoncé sa stratégie en janvier 2013 : ouverture de l'entreposage en 2021 et ouverture du stockage en 2048 [19].

- **La Finlande et la Suède**

La Finlande et la Suède sont les deux pays qui ont poussé le plus avant leurs réflexions en ce sens, puisqu'elles ont déjà respectivement sélectionné les sites d'Olkiluoto et d'Osthammar. Elles abordent la phase de demande d'autorisation de construction et la mise en service de leur centre de stockage est prévue entre 2020 et 2025 [1].

Des travaux d'exploration avaient été lancés en 1980 dans cinq sites potentiels en Finlande. Le site de la presque île d'Olkiluoto, où le sol est constitué de gneiss, a été retenu et le chantier a démarré en 2004. Il accueille à la fois une centrale nucléaire et le centre d'enfouissement situé à environ 420 m de profondeur. Les combustibles nucléaires usés doivent être stocker pour une durée d'au minimum 100 000 ans. Les barres de combustibles seront enfermés dans des fûts en acier, eux-mêmes glissés dans des cylindres en cuivre, le tout enrobé de bentonite, une argile pouvant absorber beaucoup d'humidité. C'est une protection triple où l'acier assure la résistance mécanique de la structure et le cuivre, la résistance chimique (rouille). Chaque fût sera ensuite scellé dans une gangue de béton à 8 m de profondeur à partir du niveau des galeries. Cette technique de sécurité, séparant les fûts des uns des autres, est inédite. Au total, 2 500 puits espacés tous les 10 m sont prévus pour stocker 5 500 tonnes de déchets hautement radioactifs. La possibilité de fuites à très longue échéance est envisagée, mais le temps passé devrait fortement diminuer l'activité de ces déchets [5].

En Suède, à l'issue de plusieurs années d'études et d'investigations détaillées et d'un important programme d'expérimentation au laboratoire d'Äspö (proche du site d'Oskarshamn). Une demande d'autorisation pour la construction d'un stockage géologique de combustibles usés a été déposée en mars 2011. S'il est autorisé, le site de stockage de combustibles sera construit à environ 500 m de profondeur, dans une roche granitique.

- **La France**

Le site de Bure dans la Meuse a été choisi pour installer un laboratoire unique au monde. Une équipe scientifique teste ici la possibilité de stockage longue durée (200 000 ans) des déchets radioactifs à grande profondeur (490 m) dans une couche d'argile de la formation du Callovo-Oxfordien.

En France, un nouvel aspect entre jeu dans le fonctionnement du futur site de stockage longue durée, il s'agit de la réversibilité. En effet, il est difficilement imaginable de pouvoir parler de stabilité politique à plus de 1 000 ans, alors peut-on réellement gérer l'avenir à des périodes comme celles de la décroissance radioactive? D'autant plus qu'en regardant le passé et les multiples changements, on peut se demander si on pourra perpétuer le confinement. La loi de programme n°2006-739 du 28 juin 2006 [20] a chargé l'ANDRA de mener des études et des recherches pour concevoir un centre de stockage réversible profond pour accueillir les déchets MA-VL et HA. Cigéo (Centre industriel de stockage géologique) est la réponse à cette demande, dont la mise en service est prévue en 2025, sous réserve de son autorisation [21].

La durée d'exploitation d'un site de stockage longue durée pourra être de l'ordre d'une centaine d'années. Ensuite, le site pourrait continuer à être surveillé pendant environ 200 ans mais le problème de la mémoire peut arriver [5]. Comment être sûr que les générations futures se souviennent du risque nucléaire dans le sous-sol? Cette question de la mémoire des déchets radioactifs suscite plusieurs réactions dans la communauté. Certains pensent que la construction de monuments avertissant de la présence d'un stockage en profondeur à cet endroit ou de l'utilisation de l'art (car l'art se préserve de génération en génération) permettrait de se souvenir et serait donc la meilleure solution.

D'autres, au contraire, estiment que si une trace est laissée, la curiosité des générations à venir prendra le dessus et les personnes chercheront à regarder. Faut-il faire confiance à l'homme ou à la géologie pour le stockage des déchets ?

Même si le stockage en couche géologique profonde représente une grande avancée dans la gestion des déchets radioactifs, d'autres axes de recherche tel que la 'séparation et transmutation' ne sont pas écartés. Ils permettent même d'apporter une certaine complémentarité pour optimiser la gestion de ces déchets à long terme.

La transmutation

Le principe de la transmutation appliquée au traitement des déchets nucléaires consiste à modifier les noyaux des éléments radioactifs à vie longue afin de transformer les isotopes concernés en des corps stables ou à durée de vie beaucoup plus courte. Les opérations de recherche ont été confiées au CEA. Ce procédé a pour objectif de réduire significativement la quantité d'éléments radioactifs à vie longue dans les déchets ultimes pour en faciliter leur gestion [1].

Les analyses du CEA de 2005 montraient cependant que cette technique ne supprimait pas la nécessité d'un stockage profond. Effectivement, la transmutation n'est actuellement applicable qu'à certains radionucléides contenus dans les déchets, à savoir, ceux de la famille de l'uranium, également appelés « actinides mineurs » (américium, curium, neptunium). Par ailleurs, les installations nucléaires nécessaires à la mise en œuvre d'une telle technique produiraient elles-mêmes des déchets qui nécessiteraient aussi d'être stockés en profondeur pour des raisons de sûreté [1]. De plus, la recherche actuelle annonce un début de solution seulement pour 2050.

Malgré ces réserves, la gestion des déchets à vie longue devrait être rendue beaucoup plus aisée et moins incertaine par la transmutation. Elle devrait permettre en principe de ramener la plus grande partie des nuisances, qui s'étendent sur des échelles de temps géologiques, à des échelles de temps « historiques », compatibles avec des durées crédibles de surveillance institutionnelle [22].

Conclusion

Nous avons vu, à travers ce rapport, une évolution majeure de la gestion des déchets nucléaires, à la fois temporellement (depuis leur apparition) et spatialement (en fonction des politiques nationales adoptées par les différents pays nucléarisés). Plusieurs catastrophes majeures ont malheureusement rappelé aux populations la dangerosité de ces résidus radioactifs et la nécessité de les gérer consciencieusement. Diverses solutions, à court ou à long terme, sont respectivement mises en place ou sont en cours de confection. Parmi les solutions à long terme, le stockage des déchets dans des formations géologiques profondes représente celle privilégiée par la plupart des pays ayant engagé un programme nucléaire. Associée aux recherches faites sur le sujet de la transmutation, une gestion durable des déchets à vie longue pourrait être envisagée au cours de ce siècle, en permettant une surveillance institutionnelle sur des échelles de temps crédibles.

Actuellement, de nombreuses collaborations internationales se sont développées pour le partage des connaissances scientifiques et l'avancement de la recherche dans le domaine du nucléaire. C'est notamment le cas en ce qui concerne le stockage géologique. La recherche française se nourrit via des accords bilatéraux avec d'autres pays, mais aussi par la participation des institutions nucléaires à des groupes de réflexion internationaux. Ces échanges portent à la fois sur les aspects scientifiques, mais également technologiques et sociétaux.

La gestion des déchets n'est, aujourd'hui, plus une problématique spécifiquement nationale, mais elle est devenue un enjeu à l'échelle internationale, qui exige une mise en commun des savoirs par les uns et les autres et une coopération mutuelle.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Assemblée Nationale, « Rapport d'information sur la gestion des déchets et matières radioactives », Juillet 2013
- [2] ANDRA, « Inventaire nationale des matières et déchets radioactifs, Rapport de synthèse », Juin 2012
- [3] ANDRA, *L'histoire des déchets radioactifs* [en ligne]
Adresse URL : <http://www.dechets-radioactifs.com/la-radioactivite/histoire.html>
- [4] CEA, *Découverte de la radioactivité* [en ligne]
Adresse URL : <http://www.cea.fr/jeunes/mediatheque/animations-flash/physique-chimie/decouverte-de-la-radioactivite>
- [5] NOUALHATD Laure, *Déchets : le cauchemar du nucléaire*, ARTE Éditions, Octobre 2009
- [6] La radioactivité.com, *Accident de Mayak* [en ligne]
Adresse URL : <http://www.laradioactivite.com/fr/site/pages/accidentssovietiques.htm>
- [7] New York State Department of Environmental Conservation, « West Valley – History and Future », Avril 2008
- [8] ASN, *Mise en demeure d'AREVA NC La Hague*, Avril 2013 [en ligne]
Adresse URL: <http://www.asn.fr/Informer/Actualites/Mise-en-demeure-d-AREVA-NC-La-Hague>
- [9] Haut Comité pour la Transparence et l'Information sur la Sécurité Nucléaire (HCTISN), *Site AREVA de la Hague* [en ligne]
Adresse URL : http://www.hctisn.fr/article.php?id_article=138
- [10] Health and Safety Executive, « Report of the investigation into the leak of dissolver product liquor at the Thermal Oxide Reprocessing Plant (THORP), Sellafield », *Health and Safety Executive Books*, 2005
- [11] Chiffres du congrès de la Mer, Saint-Cast, du 31 mai au 4 juin 1964
- [12] ARTE, *Les déchets radioactifs en mer* [en ligne]
Adresse URL: <http://future.arte.tv/fr/sujet/dechets-nucleaires-les-cotes-francaises-poubelles-de-leurope>
- [13] Quéneudec Jean-Pierre, « Le rejet à la mer de déchets radioactifs », *Annuaire français de droit international*, volume 11, pp 750-782, 1965
- [14] SFEN, *Les rejets radioactifs des installations nucléaires*
Adresse URL : <http://www.sfen.org/Les-rejets-radioactifs-des.734>
- [15] ASN, « Les rejets radioactifs en France », *Contrôle*, n°177, 2007

- [16] Directive 96/29/EURATOM du 13 mai 1996
- [17] OECDE, « Tchernobyl - Évaluation de l'impact radiologique et sanitaire », Mise à jour 2002 de *Tchernobyl : 10 ans déjà*
- [18] IRSN, « Impact environnemental de l'accident de Fukushima-Daiichi - Annexe 2 du dossier 'Accident de Fukushima-Daiichi : état des lieux 2 ans après l'événement' », n°44, 2013
- [19] ANDRA, « Stockage de déchets radioactifs : où en sont les autres pays ? », *Cigéomag*, Mars 2013
- [20] Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 « Politique nationale pour la gestion durable des matières et des déchets radioactifs »
- [21] ANDRA, « Rendre gouvernable les déchets radioactifs - Le stockage profond à l'épreuve de la réversibilité », n°381, Septembre 2010
- [22] Encyclopédie Universalis, *Nucléaire - La transmutation des déchets* [en ligne]
Adresse URL : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/nucleaire-dechets/3-la-transmutation-des-dechets/>