

# LA CRISE MONDIALE DES DÉCHETS NUCLÉAIRES

**RAPPORT COMMANDÉ  
PAR GREENPEACE FRANCE**

---

**BIOGRAPHIES 3**

**RÉSUMÉ DU RAPPORT 6**

**1. DÉCHETS NUCLÉAIRES :  
LA SITUATION ACTUELLE 16**

**2. BELGIQUE 38**

**3. FRANCE 49**

**4. JAPON 63**

**5. SUÈDE ET FINLANDE 72**

**6. ROYAUME-UNI 90**

**7. ÉTATS-UNIS 98**

---

Publié en janvier 2019 par Greenpeace France

**Auteurs :** Pete Roche, Bertrand Thuillier, Bernard Laponche, Miles Goldstick,  
Johann Swahn, Hideyuki Ban et Robert Alvarez

**Coordination :** Shaun Burnie, Greenpeace Allemagne

**Graphisme :** Alexandra Bauch, bureau-abcd.com

**Traductions version française :** Jean-Luc Thierry

Greenpeace est une organisation internationale qui agit selon les principes de non-violence pour protéger l'environnement et la biodiversité et promouvoir la paix.  
Elle est indépendante de tout pouvoir économique et politique et s'appuie sur un mouvement de citoyennes et citoyens engagés pour construire un monde durable et équitable.

# **BIOGRAPHIES**

# BIOGRAPHIES

---

**ROBERT ALVAREZ** est chercheur associé à l'Institute for Policy Studies, à Washington DC. M. Alvarez a été conseiller politique senior auprès du Secrétaire et du Secrétaire adjoint pour la sécurité internationale et l'environnement du Département américain de l'Énergie, de 1993 à 1999. Durant ce mandat, il a dirigé des équipes en Corée du Nord pour mettre en place un contrôle des matières nucléaires. Il a également coordonné la planification stratégique des matières nucléaires du Département de l'Énergie et mis en place son premier programme de gestion des actifs. Avant de rejoindre le Département de l'Énergie, M. Alvarez a été pendant six ans enquêteur principal pour le Comité des affaires gouvernementales du Sénat américain et l'un des principaux experts du Sénat en matière de programmes d'armes nucléaires. En 1975, Alvarez a contribué à la création et à la direction de l'Environmental Policy Institute, une organisation américaine reconnue d'intérêt public.

**HIDEYUKI BAN** est codirecteur du Citizen's Nuclear Information Center (CNIC) à Tokyo. Depuis 2013, il est membre du groupe de travail conjoint du ministère japonais de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie sur les déchets radioactifs du Sous-comité sur l'énergie nucléaire, du Comité consultatif sur les ressources naturelles et l'énergie. Il est l'auteur de multiples analyses et des livres « Our Path to a Nuclear-Free Japan: Policy Outline for a Nuclear Phaseout » (co-auteur) et « Critique Japan's Nuclear Policy Framework ».

**MILES GOLDSTICK** travaille depuis 2008 au Secrétariat des déchets nucléaires du Mouvement suédois pour l'environnement (Milkas), une coalition entre les Amis de la Terre Suède et le Mouvement antinucléaire suédois. Il effectue des recherches et publie des articles sur le cycle du combustible nucléaire depuis le milieu des années 1970. Il est titulaire d'un doctorat en Écologie et protection de l'environnement de l'Université suédoise d'études agricoles d'Uppsala, en Suède. Il est l'auteur de multiples analyses et du livre « Wollaston » sur l'impact de l'extraction de l'uranium sur les peuples autochtones de la province de Saskatchewan, au Canada.

**BERNARD LAPONCHE** est polytechnicien, docteur ès sciences en physique des réacteurs nucléaires, docteur en économie de l'énergie. Il a travaillé au Commissariat à l'énergie atomique (CEA) dans les années 1960 et 1970. Responsable syndical à la CFDT dans les années 1970, directeur puis directeur général de l'Agence française pour la maîtrise de l'énergie (AFME, aujourd'hui ADEME) de 1982 à 1987, il a poursuivi de 1988 à 2012 une activité de consultant international (pays de l'Est et de la Méditerranée, Chine...) dans le domaine de la maîtrise de l'énergie (cofondateur du bureau d'études ICE) et a été conseiller technique de Dominique Voynet pour l'énergie et la sûreté nucléaire en 1998-99. Il est cofondateur et membre des associations Global Chance et Energie Partagée et co-auteur de « Maîtrise de l'énergie pour un monde vivable » et « En finir avec le nucléaire, pourquoi et comment ».

**PETE ROCHE** est un consultant sur les questions énergétiques basé à Édimbourg. Il est conseiller politique auprès du regroupement des collectivités locales écossaises et britanniques sans nucléaire (Scottish & UK Nuclear Free Local Authorities). Il a été chargé de campagne Nucléaire pour Greenpeace UK pendant treize ans, jusqu'en avril 2004. Il est titulaire d'une licence en Sciences écologiques de l'Université d'Édimbourg. Il a été cofondateur de la Campagne écossaise pour la résistance à la menace atomique (Scottish Campaign to Resist the Atomic Menace - SCRAM) en 1976, qui a organisé certaines des plus grandes manifestations antinucléaires au Royaume-Uni, à la centrale nucléaire de Torness, près d'Édimbourg, dans les années 1970 et 1980. Pendant 30 ans, il a travaillé sur les questions environnementales en tant que militant et sur les questions d'efficacité énergétique, à la fois en tant qu'installateur et en tant que consultant. Il a représenté Greenpeace à l'occasion de rencontres internationales et nationales, notamment lors de réunions de la convention OSPAR, de l'OMI et de l'ONU, ainsi que lors du BNFL National Stakeholder Dialogue au Royaume-Uni. Il a également été membre du comité du gouvernement britannique chargé d'examiner les risques radioactifs des émetteurs internes et a été consultant pour le Comité sur la gestion des déchets radioactifs (CoRWM). Plus récemment, il a conseillé des membres du Parlement écossais sur l'efficacité énergétique et la micro génération. Pendant son temps libre, Pete participe à un programme local de « Logs for labour » qui consiste à aider à la gestion des forêts locales tout en obtenant du combustible pour son système de chauffage.

---

**BERTRAND THUILLIER** est agronome et professeur associé à Polytech Lille, à l'Université de Lille I. Il est diplômé de l'Institut national agronomique Paris-Grignon (INA-PG), ancien élève de l'Institut asiatique de gestion à Manille, aux Philippines, et titulaire d'un doctorat en sciences (Biologie) de l'Université de Reims. Après avoir travaillé pendant trois ans dans le secteur militaire puis dans l'industrie alimentaire au sein d'un centre de recherche, il est devenu, au sein du même groupe, le responsable de la coordination industrielle pour la gestion des opérations de contrôle qualité, de la production et de la logistique. Il a également eu pour fonction d'élaborer des plans d'assurance qualité en Europe, principalement en Italie, aux Pays-Bas, en Allemagne, en Suisse et en Espagne. Il dirige maintenant sa propre société de conseil et d'informatique pour l'industrie alimentaire et les cosmétiques dans le domaine du développement de nouveaux produits et de l'évaluation de produits. Il enseigne l'évaluation sensorielle dans différentes universités, en particulier les aspects méthodologiques et les statistiques correspondantes.

# RÉSUMÉ DU RAPPORT

# RÉSUMÉ

**“ Leur toxicité, en termes généraux, à la fois radioactive et chimique, est de loin supérieure à celle de n’importe quel matériau industriel auquel nous ayons été confrontés jusqu’à maintenant, que ce soit dans ce pays ou dans tout autre pays, ”**

expliquait Abel Wolman, professeur à l’Université Johns Hopkins, lors de la première audition sur les déchets nucléaires devant le Congrès américain, en janvier 1959.

La chaîne internationale du combustible nucléaire comprend plusieurs phases qui produisent toutes de grandes quantités de déchets nucléaires. La chaîne débute par l’exploration de l’uranium, son extraction, le traitement du minerai, sa conversion en une matière première utilisable par les usines d’enrichissement d’uranium, puis la fabrication du combustible, et se poursuit par l’exploitation de réacteurs nucléaires commerciaux, qui génère un combustible usé hautement radioactif qui est soit directement entreposé, soit retraité. Plus de 60 années de programmes nucléaires commerciaux ont produit des éléments radioactifs qui resteront dangereux pour l’être humain et l’environnement à une échelle de temps qui dépasse de loin l’existence de la civilisation humaine.

Greenpeace a demandé à des experts mondiaux dans le domaine des déchets nucléaires de donner un aperçu de la situation actuelle des déchets nucléaires dans le monde. Alors que l’industrie nucléaire continue de se démener pour être concurrentielle sur le marché mondial de l’énergie, en rapide évolution, l’héritage toxique de décennies d’exploitation de réacteurs nucléaires et de tous les déchets qui continuent à être produits pour assurer leur fonctionnement reste un élément central dans tout débat sur l’avenir de l’énergie nucléaire, notamment sur les décisions relatives à l’abandon progressif des réacteurs nucléaires. Pour chaque année d’exploitation supplémentaire des réacteurs nucléaires, des volumes de déchets nucléaires continueront d’être générés dans le monde entier. Aucune solution, nulle part, n’a été trouvée pour la gestion à long terme des énormes volumes de déchets nucléaires. Cela concerne notamment les combustibles usés extrêmement radioactifs générés dans tous les réacteurs nucléaires, pour lesquels tous les efforts visant à trouver des options de stockage définitif sans risques pour la sûreté et la sécurité ont échoué.

## DE LA MINE AU RÉACTEUR

L’extraction de l’uranium produit une grande quantité de déchets. Par rapport à une roche normale, ces derniers contiennent souvent des concentrations élevées de radioisotopes. D’autres terrils de déchets contiennent du minerai avec une teneur trop faible pour être traités. Ces terrils de déchets menacent les populations locales en raison du dégagement de gaz radon et des eaux d’infiltration qui contiennent des matériaux radioactifs et toxiques. Les résidus des usines de concentration ont été évacués pendant des décennies sous forme de boues d’abord directement dans l’environnement, puis dans des bassins spéciaux ou sous forme de terrils, et ensuite abandonnés.

Le processus d’extraction et de traitement retire des produits chimiques dangereux de leur emplacement souterrain relativement sûr et les convertit en un sable fin, puis en boues, ce qui augmente le risque de leur dispersion dans l’environnement. Après environ un million d’années, la radioactivité des résidus et donc les rejets de radon auront diminué de telle manière qu’elle ne sera limitée que par les teneurs résiduelles en uranium, qui continuent de produire du nouveau thorium-230. L’inventaire des résidus de traitement de l’uranium dans le monde s’élevait à 2,3 milliards de tonnes en 2011<sup>1</sup>. Le type de réacteur le plus utilisé dans le monde, le réacteur à eau ordinaire, doit utiliser un combustible à l’uranium enrichi. La concentration de l’isotope fissile <sup>235</sup> dans l’uranium naturel n’est que d’environ 0,71%. Pour fabriquer du combustible nucléaire pour la plupart des réacteurs, ce pourcentage doit être augmenté jusqu’à environ 3 à 5% dans des usines d’enrichissement de l’uranium. Les opérations d’enrichissement génèrent un sous-produit important, l’uranium appauvri, dont les stocks sont actuellement estimés à 1,7 million de tonnes dans le monde.

## COMBUSTIBLE USÉ

L’étape suivante dans la chaîne du combustible nucléaire est l’enrichissement et la fabrication du combustible, dernière étape avant le chargement du combustible nucléaire enrichi dans un réacteur nucléaire qui produit alors de l’électricité. Tous les 12 à 18 mois, ce combustible est déchargé du réacteur : c’est le combustible nucléaire usé. L’Agence internationale de l’énergie atomique estime qu’environ 370 000 tonnes de métal lourd (tML) de combustible usé ont été produites depuis l’avènement de la production de l’énergie nucléaire civile, dont 120 000 tML ont été retraitées<sup>2</sup>.

Il existe maintenant un stock mondial d'environ 250 000 tonnes de combustibles usés hautement radioactifs, réparti dans environ 14 pays. La majeure partie de ce combustible irradié reste entreposée dans des piscines de refroidissement sur les sites des réacteurs, qui manquent de défenses en profondeur, comme le confinement secondaire, et sont vulnérables à une perte de refroidissement et, dans de nombreux cas, ne disposent pas d'une alimentation de secours indépendante. L'accident de Fukushima en mars 2011 a clairement montré que le risque thermique élevé des piscines de combustible usé n'était pas un problème abstrait. Le Conseil de l'énergie atomique de l'époque avait averti le Premier ministre Naoto Kan que la perte de contrôle des piscines de combustible usé de Fukushima Daiichi pouvait entraîner une contamination radioactive si grave que le gouvernement serait alors « dans l'obligation d'évacuer 50 millions de personnes. Cela aurait été comme perdre une guerre majeure... Je craignais qu'il en résulte des décennies de bouleversements et que cela se traduise par la fin de l'État japonais », comme le dira plus tard le Premier ministre N. Kan<sup>3</sup>. Chaque année d'exploitation de réacteurs commerciaux dans le monde produit environ 12 000 tonnes de combustible usé supplémentaire. L'une des raisons pour lesquelles la durée de vie des réacteurs et les décisions de sortie du nucléaire jouent un rôle central tient à la quantité de déchets nucléaires de haute activité que le monde devra en fin de compte gérer.

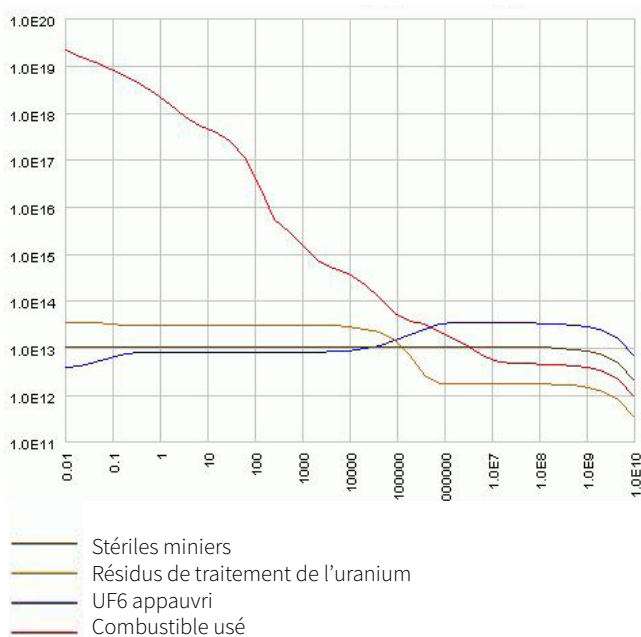
## RETRAITEMENT DU PLUTONIUM

Technologie mise au point dans les premières années des programmes d'armes nucléaires américain et russe, le retraitement commercial a été déployé dans plusieurs pays dans le but de séparer chimiquement le plutonium du combustible usé des réacteurs. Le plutonium est généré à la suite de la fission de l'uranium dans des réacteurs nucléaires. La justification initiale du retraitement a été la production de plutonium pour la fabrication d'armes nucléaires, qui a évolué pour intégrer la production de plutonium destinée à l'alimentation des réacteurs à neutrons rapides, qui produiraient à leur tour encore plus de plutonium. Malgré l'échec des programmes commerciaux de réacteurs surgénérateurs, le retraitement ou la séparation du plutonium se poursuit en France et en Russie, le Royaume-Uni devant mettre fin au retraitement en 2020 et le programme du Japon étant paralysé par des années de retard. Outre les rejets directs de déchets nucléaires via des conduites et les rejets radioactifs dans l'atmosphère, le retraitement produit de nombreux autres flux de déchets, dont les plus dangereux sont les déchets liquides de haute activité.

## DES ÉCHELLES DE TEMPS QUI LAISSENT LES RISQUES RADIOLOGIQUES SANS SOLUTION

L'utilisation de l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité au cours des 60 dernières années a créé une situation de crise pour les déchets nucléaires, pour lesquels il n'existe aucune solution à l'horizon, mais qui nécessiteront une gestion et un entreposage sûrs, puis un stockage définitif pendant plusieurs centaines de milliers d'années. Pour illustrer les différentes échelles de temps à prendre en compte, le graphique ci-dessous compare la radioactivité des différents déchets générés chaque année par un réacteur nucléaire de 1 000 MW. Au départ, l'activité du combustible usé est de loin la plus importante, mais elle diminue continuellement. En revanche, la radioactivité de l'uranium appauvri augmente en fait à long terme, de sorte qu'au bout d'un demi-million d'années, elle dépasse celle du combustible usé. (NB : les deux échelles sont logarithmiques).

Activités [Bq] en fonction du temps [a]





---

## UNE ESCALADE DES COÛTS ET DES INCERTITUDES ÉNORMES

Comme pour le financement de nouveaux réacteurs nucléaires, les coûts liés à la gestion et au stockage définitif des déchets nucléaires, notamment du combustible irradié, augmentent constamment. Ce qui est clair, c'est qu'aucun pays ne dispose d'une estimation crédible de la totalité des coûts qui seront supportés pour gérer les déchets nucléaires pendant de nombreuses décennies, voire des siècles. Les estimations de coûts récentes sont même inexistantes dans de nombreux pays. Les coûts donnés ci-dessous, presque sans exception, n'incluent pas les vastes quantités d'autres déchets nucléaires résultant de la chaîne du combustible nucléaire. Cet énorme fardeau financier qui s'annonce, devra inévitablement être supporté par les contribuables.

En **France**, il est très difficile de chiffrer précisément le coût de gestion total des déchets qui augmente au fil du temps. D'après la Cour des comptes, fin 2013, le total des charges brutes pour la gestion des déchets à long terme s'élevait à 32 Mds €, dont 26 Mds à financer par EDF (81%). C'est sans compter les charges de gestion des combustibles usés: estimées à 16 Mds d'euros par EDF au 31 décembre 2013. Enfin, en ce qui concerne le coût du projet Cigéo d'enfouissement en couche géologique profonde des déchets HAVL et MA-VL: en 2015, l'ANDRA l'estimait à 35 Mds d'euros. Mais en 2016, le gouvernement fixait, par décret, le coût de Cigéo à 25 Mds d'euros.

En **Belgique**, les coûts totaux, compte tenu d'une marge pour les événements imprévus, étaient estimés à trois milliards d'euros en 2011<sup>4</sup>, mais se situent désormais à 8, voire 10 milliards d'euros<sup>5</sup>.

En **Suède**, en 2017, SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co) a estimé à 9,5 milliards d'euros le total des coûts futurs jusqu'à la date de la fermeture de toutes les installations de gestion de tous les déchets nucléaires provenant de réacteurs nucléaires. Sur ce total, trois milliards d'euros seraient consacrés au combustible usé<sup>6</sup>.

Au **Japon**, le coût du stockage des déchets a été estimé en 2011 à 29 milliards d'euros par le ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie (METI)<sup>7</sup>. Mais ce chiffre est basé sur un calendrier totalement irréaliste, alors que des retards de plusieurs décennies sont inévitables et vont entraîner des coûts beaucoup plus élevés.

En 2008, aux **États-Unis**, le Département de l'Énergie (DOE) a publié une estimation révisée des coûts de cycle de vie qui atteint 100 milliards d'euros pour le stockage définitif de 70 000 tonnes de combustible usé de réacteurs commerciaux sur le site de Yucca Mountain. Mais avec plus de 112 000 tonnes de combustible usé prévues avec la poursuite de l'exploitation de réacteurs, ces coûts vont aussi considérablement augmenter.

Pour le **Royaume-Uni**, les modèles de coûts actuels pour l'installation de stockage prévue (GFD) atteignaient 12,6 milliards d'euros en 2008, mais ils excluent le combustible usé provenant de nouveaux réacteurs nucléaires<sup>8</sup>. Comme dans le monde entier, les incertitudes sont énormes.

# PROJETS DE STOCKAGE DES DÉCHETS NUCLÉAIRES — LA SITUATION DANS DIFFÉRENTS PAYS

Greenpeace a demandé une série de contributions à des experts qui ont passé en revue les politiques récentes, actuelles et futures en matière de déchets nucléaires, en mettant l'accent sur la gestion du combustible usé. S'il existe de nombreux autres pays dans le monde qui possèdent des déchets nucléaires, notamment ceux qui n'ont jamais exploité de réacteurs nucléaires mais qui sont d'importants fournisseurs d'uranium, le choix de ces pays fait ressortir une question récurrente: aucun pays n'a encore trouvé comment gérer de façon sûre les déchets nucléaires. On trouvera ci-après des points de synthèse issus de chaque section consacrée à un pays, ainsi que des exemples communs à tous les pays aux prises avec les difficultés de la gestion des déchets nucléaires.

Dans le monde entier, l'industrie nucléaire, avec le soutien des gouvernements à différents niveaux, maintient le choix du stockage géologique du combustible usé, les déchets nucléaires les plus dangereux. Pourtant, nulle part dans le monde, un stockage souterrain viable, sûr et durable à long terme n'a été mis en place. Même en Suède et en Finlande, où les initiatives de l'industrie nucléaire sont les plus avancées, il subsiste de grandes incertitudes quant à la justification scientifique du stockage, ainsi que des obstacles à la réalisation de ces projets qui tournent autour des questions d'acceptation politique, juridique et publique. Différentes questions clés restent sans réponse au niveau international:

- Les délais nécessaires pour empêcher de façon sûre la diffusion des déchets nucléaires dans l'environnement, y compris les impacts radiologiques potentiels pour les générations futures, s'étendent sur des siècles et des centaines de milliers d'années.
- Alors que la stabilité des pays se mesure en années et peut-être en décennies, on peut s'interroger sur la viabilité des États au cours des échéances de plusieurs milliers d'années nécessaires à la gestion de certains déchets nucléaires.
- Est-il possible d'assurer l'intégrité géologique, notamment l'étanchéité du puits de stockage et du site ?
- Comment garantir et assurer la maintenance future de galeries souterraines de déchets nucléaires qui pourraient s'effondrer ?

- Comment assurer un financement suffisant, alors que les coûts restent des estimations et que les délais en jeu dépassent de beaucoup la viabilité commerciale des producteurs actuels de déchets nucléaires, notamment de compagnies électriques extrêmement vulnérables ?

- Comment les déchets et le système de conteneurs lui-même vont-ils évoluer au fil des siècles et au-delà ?

La conclusion commune des différentes revues de pays est qu'aucune de ces questions et bien d'autres n'ont été résolues. Compte tenu de la nature particulièrement dangereuse des déchets nucléaires, en particulier des déchets de haute activité, il incombe aux gouvernements, aux autorités de sûreté et à l'industrie de donner la priorité à la gestion des déchets nucléaires au plus haut niveau de sécurité et de sûreté, afin de réduire les risques, à la fois actuels et à venir. Pour les déchets de haute activité, notamment le combustible usé, la seule conclusion crédible est que la première étape doit consister à réduire l'ampleur du problème, ce qui signifie en pratique arrêter leur production le plus tôt possible grâce à l'arrêt des centrales nucléaires. Pour le combustible usé existant, l'entreposage à sec sécurisé en conteneurs reste l'option la moins menaçante pour les prochaines décennies. L'industrie affirme qu'elle est en train de réaliser des progrès significatifs dans la gestion des déchets nucléaires de haute activité mais manque d'éléments crédibles.

## BELGIQUE

Malgré des décennies d'investissements dans la recherche et le développement, sur le site de stockage définitif de déchets de haute activité prévu dans la région de Mol, il reste des risques inhérents, importants et multiples. Parmi ces derniers :

- Le choix d'une matrice argileuse pour le stockage en profondeur, une roche saturée en eau et non auto-porteuse.
- La profondeur du site, trop proche de la surface et à quelques dizaines de mètres de sources d'eau potable importantes.
- L'épaisseur de la couche, trop faible et de surcroît avec un pendage (selon un faible pourcentage équivalent à une dérive de 40 mètres pour un pendage de 2 % sur 2 kilomètres). Une telle installation industrielle peut nécessiter une disposition strictement horizontale pour des questions de circulation et d'embranchements.

On pourra noter également les nombreux risques d'exploitation associés à la co-activité et les importantes nuisances liées à la très importante ventilation à proximité de zones habitées. Les coûts du projet ont fluctué. Les coûts totaux actuels, compte tenu d'une marge pour événements imprévus, estimés à 3 milliards d'euros en 2011<sup>9</sup>, s'élèvent désormais à 8, voire 10 milliards d'euros<sup>10</sup>.

## FRANCE

Avec le deuxième parc de réacteurs nucléaires dans le monde (58 réacteurs électronucléaires en exploitation), la France est confrontée, au niveau des déchets nucléaires, à une situation de crise qui touche toutes les catégories de déchets. Plus de 60 ans après le lancement du programme nucléaire français, le pays ne s'est pas rapproché pour autant d'une « solution » à la crise des déchets nucléaires ni même d'une reconnaissance de l'ampleur du défi. Le retraitement a compliqué la crise des déchets nucléaires en France, en aboutissant à la production de plutonium, de déchets de haute activité vitrifiés et de combustible MOX (oxyde mixte). En ce qui concerne les déchets de haute activité, une législation a été adoptée pour étudier la faisabilité d'un stockage en profondeur dans un site argileux. CIGEO (Centre industriel de stockage géologique), situé à Bure, est l'installation prévue pour le programme de stockage de déchets de haute (et de moyenne) activité en France. Des vulnérabilités, des lacunes et des obstacles ont déjà été identifiés par trois avis officiels (ceux de l'ASN, de l'IRSN et d'une expertise indépendante), ce qui soulève de sérieuses questions sur le projet CIGEO présenté par l'ANDRA.

### Les principaux problèmes évoqués dans le volet français de ce rapport sont les suivants :

- Le projet est de stocker sur le site de Bure des déchets de « haute activité à vie longue », HA-VL : environ 10 000 m<sup>3</sup> en volume non conditionnés et de l'ordre de 30 000 m<sup>3</sup> en colis conditionnés pour l'enfouissement de 60 000 colis ; des déchets « de moyenne activité à vie longue » (MA-VL) : environ 70 000 m<sup>3</sup> en volume, non conditionnés, soit de l'ordre de 350 000 m<sup>3</sup> en colis conditionnés (180 000 colis), dont 75 000 d'enrobés bitumineux.
- Ces chiffres ne tiennent pas compte des déchets classés dans la catégorie « matières nucléaires », qui devraient en fin de compte être classés dans la catégorie des déchets et qui, dans le cas des déchets à haute ou moyenne activité à vie longue, exigent un traitement similaire à celui qui est actuellement prévu dans le Projet CIGEO.

Un exemple de cette situation est donné par le combustible usé non destiné au retraitement (notamment les combustibles MOX usés). De même, aucune disposition n'a été prise pour le plutonium actuellement stocké à La Hague.

- En termes de risques, l'ANDRA a admis qu'« une explosion pourrait entraîner une perte de confinement » du site de CIGEO et s'accompagner éventuellement de la dispersion de radionucléides dans le site de stockage.

- Le risque le plus grave est celui de l'incendie, étant donné la présence simultanée dans les alvéoles de déchets HAVL d'hydrogène et de colis inflammables. L'IRSN a démontré que cette faiblesse du stockage était réelle et qu'il existe un véritable risque d'incendie dans une alvéole de stockage qui pourrait aussi aboutir au rejet de gaz radioactifs. La modélisation de l'IRSN montre que la vague de chaleur provenant d'un incendie démarré dans un colis donné pourrait se propager à un colis cible en quelques heures. Il serait impossible de reprendre une exploitation « normale » après un tel accident.

- À long terme, le risque d'une migration de l'eau existe également sur le site de CIGEO. L'ASN a demandé à l'ANDRA de faire la démonstration des mécanismes d'écoulement de l'eau dans la roche de CIGEO dans ses simulations visant à la démonstration de la robustesse du dispositif de stockage. Le risque d'infiltration d'eau dans les couches géologiques est probablement le risque « technique » – et inévitable – le plus important à long terme.

- Comme dans d'autres pays, les législateurs nationaux ont imposé le concept de réversibilité dans la loi du 28 juin 2006, Article 5. Cependant, dans les faits, la réversibilité prévue n'est pas crédible, elle se limite à la période de fonctionnement (ce qui équivaut à peu de générations futures) et l'on sait maintenant que la possibilité de récupérer un ou plusieurs colis de déchets nucléaires (l'application réelle de la réversibilité) n'est obligatoire que pendant la phase industrielle pilote, au début de la période d'exploitation du site et non après sa fermeture définitive.

- Enfouir ces déchets de manière totalement irréversible dans les profondeurs souterraines, sans aucun espoir de changement de stratégie, fait subir aux générations futures un problème de pollution souterraine qu'elles vont découvrir et dont elles vont souffrir, sans aucun moyen de le résoudre.

---

- Il n'existe actuellement aucune solution crédible pour un stockage sûr à long terme des déchets nucléaires en France, l'urgence est de réduire les risques liés aux déchets existants, notamment au combustible usé. L'État français doit mettre l'accent sur l'amélioration de la sûreté et de la sécurité des sites d'entreposage et de stockage actuels.

Le gouvernement et le parlement français doivent réexaminer de toute urgence le projet CIGEO, qui aboutira inévitablement à une impasse et entraînera nécessairement des coûts considérables qui incomberont en définitive aux citoyens français. Ils doivent également mettre en place des installations d'entreposage provisoire à sec, associées à des programmes de recherche de haut niveau visant à réduire la radioactivité et la durée de vie des déchets les plus dangereux.

La stratégie actuelle de gestion des déchets radioactifs, élaborée après une longue période de désintérêt et fondée sur un choix de retraitement du combustible, de production de plutonium ou de différenciation (douteuse) entre matières à fort potentiel et déchets, doit être revue.

## **JAPON**

Comme la plupart des pays dotés d'un programme nucléaire depuis un demi-siècle ou plus, le Japon a été contraint d'abandonner ses projets d'évacuation des déchets nucléaires de haute activité par immersion, du fait de la Convention sur la prévention de la pollution marine par l'immersion de déchets et d'autres matières, également appelée Convention de Londres ou LDC, adoptée en 1972.

- Du fait des risques sismiques élevés, l'accent a été mis sur les barrières techniques (plus que sur les barrières naturelles) pour assurer la sécurité du stockage géologique au Japon. Malgré des décennies d'investissement, le Japon n'a pas réussi à démontrer la viabilité du stockage géologique.

- La politique du cycle du combustible nucléaire reste centrée sur le retraitement de tout le combustible usé qui n'est actuellement pas classé comme déchet de haute activité. Un changement de cette politique reste la seule option future viable: le programme de retraitement du plutonium a pris plusieurs décennies de retard, a dépassé son budget de plusieurs milliards d'euros et n'est pas réalisable.

- Le seul projet de recherche souterrain se trouve à Horonobe, sur l'île septentrionale de Hokkaido, dont la géologie est relativement récente et s'est formée il y a seulement environ 100 000 ans: des mudstones, avec un grand nombre de fissures et de grandes quantités d'eau souterraine. La question de l'eau porte à la fois sur les eaux de surface et l'eau de mer fossile.

- Aucun site approprié sans risque sismique n'a été identifié; avec une forte opposition du public à la simple suggestion d'un site dans leur communauté, 21 gouverneurs de préfecture sur 46 ont déjà déclaré qu'ils n'accepteraient pas d'autres recherches sur le stockage géologique dans leur région.

- Les estimations de coûts actuelles manquent totalement de crédibilité et s'élèvent à seulement 3 800 milliards de yens (2,9 milliards d'euros).

- Dans les faits, les combustibles usés sont des déchets nucléaires de haute activité et rien ne justifie le retraitement et la séparation du plutonium. Le combustible irradié restera sur les sites de stockage des réacteurs et dans l'usine de Rokkasho-mura dans un avenir prévisible. Comme le Conseil scientifique du Japon l'avait correctement annoncé dans son rapport de 2012 au Bureau du Cabinet, la seule option est de s'engager dans l'entreposage provisoire des déchets de haute activité pour une période pouvant aller jusqu'à 300 ans.

## **SUÈDE ET FINLANDE**

Depuis le milieu des années 1970, l'industrie nucléaire et les pouvoirs publics consacrent d'importants moyens financiers à la gestion à long terme de l'ensemble des déchets nucléaires, en particulier du combustible irradié. Il existe actuellement un entreposage du combustible usé pendant environ 30 ans dans les installations souterraines du Clab, situées à Oskarshamn et actuellement en exploitation. Une demande de la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) visant à construire un système souterrain de gestion du combustible usé utilisant la méthode KBS-3 est officiellement en cours d'examen. Les problèmes et difficultés techniques de l'installation KBS-3 en Suède s'appliquent également à l'installation « Onkalo » partiellement construite en Finlande et où les conditions géologiques sont de façon générale similaires à celles de la Suède. L'industrie nucléaire du monde entier voit dans les progrès réalisés en Suède et en Finlande une vision de l'avenir, mais la réalité est très différente:

---

- La sûreté de la méthode KBS-3 repose sur un certain nombre d'hypothèses de principe non démontrées; elle suppose notamment que le matériau du conteneur, de la fonte entourée de cuivre, se corrodera si lentement que les radionucléides ne seront pas libérés pendant la période au cours de laquelle les déchets sont dangereux pour les êtres vivants.

- En raison de la complexité des facteurs responsables de la corrosion, il n'est pas certain que le cuivre et le fer soient des matériaux adaptés. Des recherches indépendantes de l'industrie nucléaire ont montré que des fuites dues à la corrosion du cuivre pourraient commencer après 100 ans et que la plupart des conteneurs subiraient des fuites après environ 1 000 ans<sup>11</sup>. En outre, aucun essai simulant le système envisagé avec du combustible usé dans un conteneur n'a été effectué.

- En 2018, l'Autorité suédoise de sûreté radiologique (SSM) a donné une approbation conditionnelle au projet SKB-3, sous réserve de résoudre les problèmes de corrosion du cuivre.

- Une décision historique de 2018, rendue par le Tribunal foncier et de l'environnement, remet en question le projet KBS-3 dans son ensemble. Le Tribunal a estimé que la sûreté n'avait pas été démontrée et que les effets du projet proposé ne pouvaient être prévus avec suffisamment de certitude pour permettre la formulation de conditions définitives. Le tribunal a également estimé que la responsabilité financière à long terme devait être clarifiée.

## **ROYAUME-UNI**

Avec des problèmes de déchets nucléaires qui comptent parmi les plus importants et les plus complexes dans le monde, la publication de deux nouveaux documents de consultation<sup>12</sup> en janvier 2018 a marqué le début de la sixième tentative du gouvernement britannique en 42 ans pour trouver une collectivité disposée à accueillir un site d'enfouissement de déchets radioactifs. L'héritage britannique en matière de déchets nucléaires a été considérablement aggravé par son programme de retraitement du plutonium basé à Sellafield, dans le nord de l'Angleterre. N'ayant pas réussi à trouver un site d'enfouissement des déchets nucléaires au cours des quarante dernières années, le gouvernement a décidé d'essayer une nouvelle approche fondée sur ce qu'il a appelé le «volontariat et le partenariat». Cependant, rien n'indique que cette récente tentative, le GDF

(Geological Disposal Facility - Installation de stockage géologique) destiné à dépasser des décennies d'échec, sera fructueuse:

- De nombreux organismes officiels ont averti que le site de Sellafield présentait un «*risque important pour les personnes et l'environnement*» et qu'il avait amassé «*une extraordinaire accumulation de déchets dangereux, en grande partie stockés dans des installations nucléaires obsolètes*». Le Conseil du comté local qui accueille le complexe nucléaire de Sellafield, et qui a enregistré le plus de tentatives de recherche de sites pour une installation de stockage géologique au fil des décennies, a déjà jugé que le programme 2018 du gouvernement était fondamentalement vicié. Il déplore en particulier l'incapacité du gouvernement à répondre au besoin d'un entreposage provisoire sécurisé, alors pourtant que les éléments les plus dangereux contenus dans les combustibles usés seront trop chauds pendant largement plus d'un siècle pour être placés dans une installation souterraine.

- Il est difficile de savoir s'il sera un jour possible de démontrer avec une quelconque crédibilité scientifique que la dose de rayonnement résultant de l'exposition des personnes près d'un site de stockage de déchets nucléaires au Royaume-Uni pourrait rester à un niveau acceptable jusque dans un avenir très lointain.

- Sans perspective de solution, le Royaume-Uni s'est lancé dans un programme de construction de nouveaux réacteurs nucléaires qui aura pour effet d'aggraver le problème, et entraînera une augmentation considérable de la radioactivité provenant du combustible usé et d'autres déchets hautement radioactifs qui devront être entreposés indéfiniment sur des sites vulnérables dispersés sur le littoral britannique.

## **ÉTATS-UNIS**

Après 60 années de fonctionnement (1957-2017), les réacteurs électronucléaires aux États-Unis ont généré environ 30% du stock mondial total de combustibles nucléaires usés – de loin la part la plus importante. Et pourtant, dans le même temps, des décennies d'efforts et des milliards de dollars d'investissement n'ont pas permis de trouver un site de stockage géologique pour le combustible usé commercial. L'installation souterraine de Yucca Mountain, sélectionnée pour des raisons politiques et en construction depuis des décennies, a été annulée par l'administration Obama en 2010 en raison du problème de l'acceptation scientifique et publique du projet.

---

Pendant près de 30 ans, les exigences en matière de stockage des déchets de la Commission de réglementation nucléaire (NRC) ont été subordonnées à l'ouverture en temps utile d'un site de stockage définitif, ce qui a permis aux exploitants d'entreposer légalement le combustible usé dans des piscines de refroidissement sur site beaucoup plus longtemps et à des densités plus élevées (en moyenne quatre fois plus élevées) que ce qui était prévu à l'origine : environ 70 % du combustible usé aux États-Unis restent entreposés dans des piscines de refroidissement vulnérables ;

- L'accumulation importante de combustible nucléaire usé dans les piscines des réacteurs américains présente un danger potentiel beaucoup plus important. En effet, les piscines contiennent plusieurs cœurs irradiés, soit trois à quatre fois plus de combustible nucléaire usé que ce qui était prévu par les concepts d'origine. Les piscines ne disposent pas de moyens de défense en profondeur tels qu'une enceinte de confinement secondaire ou une alimentation électrique de secours qui leur soit propre

- Une estimation révisée en 2008 des coûts de cycle de vie réalisée par le Département de l'Énergie (DOE) atteint 113 milliards de dollars (dollars 2016) soit 97 milliards d'euros 2018, pour le stockage définitif de 70 000 tonnes de combustible usé de réacteurs commerciaux sur le site de Yucca Mountain dans le Nevada, une quantité dépassée par le stock actuel en 2018. Selon la législation en vigueur, une quantité de combustible nucléaire usé encore plus importante devrait être stockée dans un second site de stockage.

- Le site de Yucca Mountain ne respecte pas les exigences géologiques de base pour le stockage de longue durée définies par l'Agence internationale de l'énergie atomique qui prévoient « des conditions géochimiques ou hydrochimiques stables en profondeur, principalement décrites par un environnement réducteur et une composition contrôlée par un équilibre entre l'eau et les minéraux formant les roches ; et une stabilité géologique à long terme (millions d'années) en termes de grands mouvements de la terre et de déformations, failles, sismicité et flux thermiques ».

- Les États-Unis ne disposent pas d'une politique cohérente pour l'entreposage en surface à long terme, qui est la seule option viable à l'heure actuelle. Compte tenu des incertitudes importantes, le Département américain de l'énergie a déclaré qu'un « entreposage prolongé, d'une durée maximale de 300 ans, est envisagé aux États-Unis ».

- 
- 1 Voir la diapositive n° 61  
<http://www.wise-uranium.org/stk.html?src=stkd01e>
  - 2 Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management, IAEA Nuclear Energy Series, No. NW-T-1.14 2018  
[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1799\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1799_web.pdf)
  - 3 Containment, Independent Lens, PBS, janvier 2016,  
<http://www.pbs.org/independentlens/films/containment/>
  - 4 NIRONDR TR 2013-12 E, p. 133
  - 5 Les échos.be - Des milliards supplémentaires pour stocker les déchets nucléaires – 22 août 2018.
  - 6 SKB. 2017-04. « Plan 2016. Costs from and including 2018 for the radioactive residual products from nuclear power. Basis for fees and guarantees for the period 2018-2020. » Technical Report TR-17.02. 52 pp. Voir p. 35, <https://www.skb.se/publikation/2487964/TR-17-02.pdf>.
  - 7 IEEJ Journal, « Major Issues Regarding Nuclear Power Generation Costs Assessment in Japan », Institute for Energy Economics Japan, citant la Commission japonaise de l'énergie atomique, 2015, <https://eneken.ieej.or.jp/data/6474.pdf>
  - 8 Ian Jackson, « Research Report Subsidy Assessment of Waste Transfer Pricing for Disposal of Spent Fuel from New Nuclear Power Stations - Independent Report for Greenpeace UK, 1er mars
  - 9 NIRONDR TR 2013-12 E, page 133
  - 10 Les échos.be - Des milliards supplémentaires pour stocker les déchets nucléaires - 22 août 2018.
  - 11 Szakálos Peter, Leygraf Christofer, Rosengren Anders, Seetharaman Seshadri, Grinder Olle, Linder Jan. 2018-04-26. « Analys av kärnbränsleförvarsfrågan efter mark-och miljödomstolens yttrande till regeringen. » (« Analyse de la question de la gestion du combustible nucléaire après la déclaration au gouvernement du Tribunal foncier et de l'environnement. ») En suédois seulement. Consulté le 5 octobre 2018 : <http://www.nonuclear.se/szakalos-et-al20180426analys-av-karnbransleforvarsfragan>. Ce document a été transmis au gouvernement pour l'examen en cours, et le gouvernement a demandé à SKB de formuler ses commentaires avant le 30 avril 2019. Parmi les auteurs figure un groupe de spécialistes de l'Institut royal de technologie (KTH) de Stockholm, à la pointe de la recherche sur la corrosion du cuivre au niveau mondial, et un ancien collaborateur de la SSM. Les recherches menées en Suède sur la corrosion du cuivre par des spécialistes indépendants ont été dirigées par le professeur associé du KTH, Gunnar Hultquist, décédé en février 2016. En 1986, il a démarré une expérience qui montrait que le cuivre se corrode dans une eau sans oxygène. Ses résultats ont finalement été confirmés au niveau international par des méthodes indépendantes.
  - 12 Department for Business, Energy and Industrial strategy (BEIS), énergétique et industrielle (BEIS) Communiqué de presse du 25 janvier 2018 <https://www.gov.uk/government/news/local-communities-to-give-views-on-permanent-disposal-of-radioactive-waste>

# 1

## **DÉCHETS NUCLÉAIRES : LA SITUATION ACTUELLE**



# DÉCHETS NUCLÉAIRES : LA SITUATION ACTUELLE

**Pete  
Roche**

Dès l'extraction de l'uranium, l'industrie nucléaire produit des déchets nucléaires dangereux. L'extraction de l'uranium génère des résidus radioactifs, qui sont collectés dans des bassins artificiels et recouverts d'une couche d'argile et de roches pour tenter d'empêcher les fuites de gaz radon.

L'industrie nucléaire produit de grandes quantités de déchets de faible activité (FA). Ceux-ci sont constitués de papier, de chiffons, d'outils, de vêtements, de filtres, etc. Ils sont souvent simplement enterrés dans des centres de stockage en surface.

Les déchets de moyenne activité (MA) contiennent des matériaux comme des résines, des boues chimiques et les gaines métalliques retirées des combustibles usés, ainsi que des pièces contaminées des réacteurs qui ont été démantelés. Même ces déchets de moyenne activité, qui contiennent des quantités de radioactivité plus élevées que les déchets de faible activité, sont enfouis dans des centres de stockage en surface dans certains pays. Sans être la catégorie de déchets la plus radioactive, les déchets de moyenne activité nécessitent généralement une certaine forme de protection et exigent une gestion attentive pour protéger la santé des travailleurs et l'environnement.

Les déchets les plus dangereux sont les déchets de haute activité, c'est-à-dire les combustibles usés déchargés des réacteurs nucléaires, qui restent radioactifs pendant des centaines de milliers d'années. Une personne qui se tiendrait à un mètre d'un assemblage de combustible usé qui a été déchargé d'un réacteur un an plus tôt recevrait une dose mortelle en environ une minute<sup>1</sup>. Dans certains pays, la situation est aggravée par le « retraitement » de ce combustible usé, opération qui consiste à le dissoudre dans de l'acide nitrique afin de séparer du plutonium utilisable dans des armes nucléaires. Ce procédé aboutit à des déchets liquides très radioactifs.

L'Agence internationale de l'énergie atomique estime qu'environ 370 000 tonnes de métal lourd (TML) de combustible usé ont été produites depuis l'avènement de la production d'énergie nucléaire civile, dont 120 000 tML ont été retraitées<sup>2</sup>.

Aucun pays au monde ne dispose d'une solution pour les déchets de haute activité<sup>3</sup>.

	Déchets radioactifs solides entreposés (m <sup>3</sup> )	Déchets radioactifs solides stockés (m <sup>3</sup> )	Proportion de stockage pour le type de déchet considéré
TFA	2 356 000	7 906 000	77 %
FA	3 479 000	20 451 000	85 %
MA	460 000	107 000	19 %
HA	22 000	0	0 %

Source : Stock de déchets nucléaires (estimations de l'AIEA pour 2018).  
Remarque : tous les chiffres volumétriques sont fournis à titre d'estimations basées sur les solutions d'élimination finale opérationnelles et proposées pour différents types de déchets.

## L'EXTRACTION DE L'URANIUM

La mine d'uranium Langer Heinrich (LHM) en Namibie a été placée en mode de maintenance et de surveillance par l'exploitant australien Paladin Energy<sup>4</sup>. La société elle-même a été confiée à des administrateurs en juillet 2017, faute de pouvoir payer une dette de 277 millions de dollars à EDF<sup>5</sup>. La seule autre mine exploitée par Paladin — la mine d'uranium Kayelekera au Malawi — la également été mise en maintenance et surveillance en 2014<sup>6</sup>. Alex Molyneux, PDG de Paladin, a déclaré : « *Le marché de l'uranium n'a pas réussi à se rétablir depuis l'incident de Fukushima en 2011* ».

Des travaux de remise en état sont nécessaires dans les deux mines, mais il est extrêmement douteux que Paladin ait réservé des fonds suffisants pour assumer ses responsabilités. Son rapport annuel 2017 prévoit une « provision de réhabilitation » de 86,93 millions USD pour couvrir les dépenses portant à la fois sur LHM et sur Kayelekera. À titre de comparaison, Energy Resources of Australia a réservé 403 millions USD pour la réhabilitation de la mine d'uranium Ranger en Australie, en plus des 346 millions USD déjà consacrés aux activités liées à l'eau et à la réhabilitation depuis 2012. La réhabilitation des mines africaines pourrait être moins chère, notamment en raison de leur taille relativement plus faible par rapport à Ranger, mais une ONG malawienne estime que la mine de Kayelekera pourrait coûter à elle seule 100 millions de dollars<sup>8</sup>.

En 2010, Greenpeace International a dressé un bilan du lourd héritage laissé par les déchets et la destruction environnementale générés par l'extraction de l'uranium au Niger par l'industrie nucléaire française<sup>9</sup>. Des nuages de poussière provoqués par des explosions contrôlées dans la mine à ciel ouvert transportent du gaz radioactif vers les villes d'Arlit et d'Akokan. Des montagnes de déchets radioactifs industriels reposent à l'air libre depuis des décennies. Et le déplacement de millions de tonnes de roches et de terre a pollué une nappe phréatique jadis propre qui disparaît aussi rapidement en raison d'une utilisation industrielle excessive. En novembre 2009, Greenpeace et ses partenaires ont pu mener à bien une brève enquête scientifique sur la zone en mesurant les niveaux de radioactivité dans et autour des villes minières. Dans certains cas, les relevés dépassaient de 100 fois les niveaux recommandés au niveau international.

D'ici une dizaine d'années, l'économie locale autour d'Arlit et Akokan va disparaître avec l'épuisement des mines d'uranium, mais les populations et la pollution de l'environnement, quant à elles, seront laissées pour compte pour les siècles à venir<sup>10</sup>. Les déchets au Niger comprennent environ 40 millions de tonnes de résidus radioactifs provenant de deux mines et 1 600 tonnes de déchets solides contaminés, ainsi que des déchets liquides supplémentaires<sup>11</sup>.

L'histoire est similaire dans d'autres régions du monde. Dans le district de Singbhum Est, dans l'État du Jharkhand, dans l'est de l'Inde, des centaines de cas de maladies congénitales et d'autres malformations à la naissance s'ajoutent à un fort taux d'infertilité, de fausses couches et de naissances prématurées près des mines d'uranium de Jadugora, où se trouvent certains des gisements d'uranium et de diuranate de magnésium de la meilleure qualité au monde. « *Les mineurs qui travaillent dans les zones minières inhalent des poussières et du gaz radon. De plus, le minerai d'uranium est transporté dans des camions non bâchés sur des routes défoncées. De ce fait, des gravats tombent sur les côtés de la route. La radioactivité provient également du déversement des stériles miniers dans des bassins non couverts* », explique Ankush Vengurlekar, un photjournaliste qui a enquêté sur les souffrances des populations victimes de cette exploitation minière « insalubre ».

Les habitants de la région rapportent que les villages situés près des bassins de décantation des résidus sont les plus touchés. Pendant la saison sèche, ces villages sont balayés par des vents porteurs de ces poussières de résidus. Pendant les pluies de la mousson, les déchets radioactifs se déversent dans les ruisseaux et les rivières alentour, ce qui provoque une irradiation interne supplémentaire, les villageois utilisant l'eau contaminée pour se laver et boire et utilisant les étangs à proximité pour la pêche<sup>12</sup>.

Au début de cette décennie, à un moment où il semblait y avoir une « renaissance » de la construction des centrales nucléaires, des entreprises chinoises, canadiennes et françaises se sont empressées d'exploiter des gisements d'uranium dans de nouveaux pays d'Afrique. En 2010, un commentateur expliquait : « *Pour pouvoir exploiter une mine au Texas, il faut deux étagères remplies d'autorisations. Au Niger, vous donnez une pelle et 2 dollars par jour à un type et vous exploitez de l'uranium* »<sup>13</sup>.

Malgré tout, en 2016, près de 75 % de la production mondiale d'uranium provenait toujours des trois principaux pays producteurs, à savoir le Kazakhstan, le Canada et l'Australie<sup>14</sup>.

L'extraction de l'uranium n'est que le début de la chaîne du combustible nucléaire, mais ces histoires illustrent la façon dont l'industrie nucléaire, après avoir accumulé des bénéfices, se décharge souvent de ses responsabilités sur les habitants de ces zones, les contribuables et les consommateurs d'électricité. Tout au long de la chaîne nucléaire, les populations locales sont exposées à des risques sanitaires accrus et pourtant, bien souvent, on ne leur a pas demandé si elles étaient disposées à supporter ces risques.

### LES DÉCHETS D'URANIUM

La plus grande partie du minerai d'uranium est extraite de mines à ciel ouvert ou souterraines. La teneur en uranium du minerai se situe souvent entre 0,1 et 0,2 % seulement. De ce fait, de grandes quantités de minerai doivent être extraites pour obtenir de l'uranium. Dans les premières années et jusqu'aux années 1960, l'uranium était principalement exploité dans des mines à ciel ouvert à partir de gisements situés près de la surface. Plus tard, l'exploitation minière s'est poursuivie dans des mines souterraines, mais beaucoup d'entre elles ont été fermées dans les années 1980 après la chute des prix. Les États-Unis avaient de nombreuses exploitations souterraines pendant la Guerre froide. Après l'épuisement des gisements, beaucoup d'entre eux ont été simplement abandonnés, souvent sans même sécuriser l'entrée de la mine, qui présente aujourd'hui encore un danger<sup>15</sup>.

Des résidus miniers sont produits dans les deux types d'exploitation. Ils contiennent souvent des concentrations élevées de radio-isotopes par rapport à une roche normale. D'autres terrils de déchets contiennent du minerai avec une teneur trop faible pour être traité. Ces terrils de déchets menacent les populations locales en raison du dégagement de gaz radon et des eaux d'infiltration qui contiennent des matériaux radioactifs et toxiques.

La plus grande mine à ciel ouvert au monde est la mine de Rossing en Namibie. De grandes quantités de matériaux doivent être retirées de la mine car la roche ne contient que 0,029 % d'uranium. Environ un milliard de tonnes de matériaux ont été retirées jusqu'à présent et un tiers de celles-ci ont été traitées dans l'usine de concentration d'uranium. Le reste a été déposé sur des résidus rocheux et des entassements de minerai à faible teneur. Les terrils de résidus rocheux laissent s'échapper des poussières radioactives et du gaz radon dans l'environnement.

Selon les travaux fondamentaux sur la chimie nucléaire publiés en 1995 par Hoppin, Rydberg et Liljenzin :

“... le Radium [Ra] et le Radon [Rn] figurent parmi les substances les plus radiotoxiques existantes et provoquent des cancers des os et des poumons à des concentrations relativement faibles ; [par conséquent] une attention particulière doit leur être accordée lorsqu'ils sont présents dans la nature <sup>16</sup>. ”

### TRAITEMENT DE L'URANIUM

Le minerai extrait dans des mines à ciel ouvert ou souterraines est broyé et lixivié dans une installation de traitement, qui est essentiellement une usine chimique conçue pour extraire l'uranium du minerai. Elle est généralement située près des mines, de façon à limiter le transport. Dans la plupart des cas, l'agent de lixiviation utilisé est de l'acide sulfurique mais la lixiviation alcaline est également utilisée. Comme l'agent de lixiviation extrait non seulement de l'uranium du minerai, mais également plusieurs autres composants comme du molybdène, du vanadium, du sélénium, du fer, du plomb et de l'arsenic, l'uranium doit être séparé de la solution de lixiviation. Le produit final fabriqué par l'installation, communément appelé « yellow cake » ( $U_3O_8$  avec des impuretés), est conditionné et expédié dans des fûts.

---

Parmi les produits encore plus indésirables figurent les résidus des usines de concentration, qui sont généralement évacués sous forme de boues dans des bassins spéciaux ou sous forme de terrils, et ensuite abandonnés. Aux États-Unis et au Canada, les plus grands terrils de ce type contiennent jusqu'à 30 millions de tonnes de matières solides. En Saxe, en Allemagne, les terrils de résidus de Helmsdorf près de Zwickau contiennent 50 millions de tonnes et en Thuringe, ceux de Culmützsch près de Seelingstädt, 86 millions de tonnes de solides<sup>17</sup>. Le traitement ne supprime pas les produits de désintégration à vie longue tels que le thorium 230 et le radium 226, et ne supprime pas la totalité de l'uranium – il en reste environ 5 à 10% – de sorte que les boues contiennent encore des métaux lourds et d'autres contaminants toxiques, tels que de l'arsenic et des réactifs chimiques utilisés au cours du processus de traitement. Le processus d'extraction et de traitement retire des produits chimiques dangereux de leur emplacement souterrain relativement sûr et les convertit en un sable fin, puis en boues, ce qui augmente le risque de leur dispersion dans l'environnement.

Le gaz radon 222 qui se dégage des amas de résidus a une demi-vie de 3,8 jours. Cette durée peut sembler courte, mais du fait de la production continue de radon par désintégration du radium 226, qui a une demi-vie de 1600 ans, le radon représente un danger à long terme. De plus, étant donné que le produit parent du radium 226, le thorium 230 (dont la demi-vie est de 80 000 ans) est également présent, il y a une production continue de radium 226.

Après environ un million d'années, la radioactivité des résidus et donc les rejets de radon auront diminué de telle manière qu'elle ne sera limitée que par les teneurs résiduelles en uranium, qui produisent en permanence du nouveau thorium-230.

Le dégagement de radon est un danger majeur qui se poursuit après la fermeture des mines d'uranium. L'Agence de protection de l'environnement (EPA) des États-Unis estime à deux cas pour cent le risque supplémentaire de cancer du poumon sur la vie entière pour des personnes habitant à proximité d'un dépôt de résidus de 80 hectares sans couverture. Étant donné que le radon se répand rapidement avec le vent, de nombreuses personnes reçoivent de petites doses de rayonnement supplémentaires. Bien que le risque supplémentaire pour un individu soit faible, il ne peut être négligé en raison du grand nombre de personnes concernées. L'EPA a estimé que les dépôts de résidus d'uranium existant aux États-Unis en 1983 causeraient 500 décès par cancer du poumon par siècle, si aucune mesure n'était prise<sup>18</sup>.

En raison de la longue demi-vie des constituants radioactifs, la sûreté des dépôts de résidus doit être garantie sur de très longues périodes. Après des pluies, des ravines peuvent se former, des inondations peuvent détruire tout le dépôt, les plantes et les animaux fouisseurs peuvent pénétrer dans le dépôt et disperser les matériaux, augmenter les rejets de radon et rendre le dépôt plus sensible à l'érosion climatique. Lorsque la surface du dépôt se dessèche, les sables fins sont emportés par le vent sur les zones adjacentes. Les infiltrations d'eau provenant des amas de résidus présentent un autre danger majeur, un risque de contamination des eaux souterraines et de surface. Les riverains sont également menacés par le radium 226 et d'autres substances dangereuses, telles que l'arsenic, dans leur approvisionnement en eau potable et dans le poisson pêché dans la région. Le problème des infiltrations est très important dans le cas des résidus acides car les radionucléides concernés sont plus mobiles dans un milieu acide.

Les ruptures de bassins de retenue de résidus ont entraîné des problèmes de pollution dans les mines d'uranium du monde entier. Vingt-et-une défaillances de bassins ont été documentées par WISE International<sup>19</sup>.

La fermeture d'une usine de traitement de l'uranium produit de grandes quantités de déchets radioactifs contaminés qui devront être stockés de manière sûre. Dans le cas de l'usine d'uranium Wismut à Crossen, en Allemagne, pour réduire les coûts, une partie des rebuts est destinée à être stockée dans les résidus de Helmsdorf, mais ils peuvent produire des gaz et menacer ainsi la sûreté du stockage définitif des boues<sup>20</sup>.

Le Projet international de WISE sur l'uranium a présenté en détail l'inventaire mondial des résidus de traitement d'uranium en 2011. Les résidus sud-africains proviennent de la récupération de sous-produits de l'uranium issus de l'extraction de l'or et une partie des résidus australiens provient de la récupération de l'uranium coproduit lors de l'extraction du cuivre (Olympic Dam). Néanmoins, le stock des résidus de traitement de l'uranium dans le monde s'élève à 2 352,55 millions de tonnes<sup>21</sup>.

Pays	Millions de tonnes de résidus de traitement de l'uranium
Australie	79
Bulgarie	16
Canada	202,13
République tchèque	89
France	29,318
Allemagne	174,45
Hongrie	29,4
Kazakhstan	165
Kirghizistan	32,3
Namibie	350
Russie	56,85
Afrique du Sud	700
Ukraine	89,5
ÉTATS-UNIS	235
Ouzbékistan	60

Source : [www.wise-uranium.org/mdaf.html](http://www.wise-uranium.org/mdaf.html)

## L'ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM

La matière première issue de l'extraction de l'uranium est connue sous le nom de yellowcake. Ce dernier contient de l' $U_3O_8$  et des impuretés. Pour l'utiliser dans des centrales électronucléaires, il faut le transformer en combustible nucléaire. Tout d'abord, l'uranium doit être converti en hexafluorure d'uranium ( $UF_6$ ), un composé qui peut facilement devenir un gaz. Cette propriété est indispensable pour le processus d'enrichissement ultérieur.

Le yellowcake contient encore des impuretés. Avant l'enrichissement, il doit donc être raffiné avant ou après avoir été converti en hexafluorure d'uranium ( $UF_6$ ). Il existe des usines de conversion commerciales aux États-Unis, au Canada, en France, en Russie et en Chine. Ce processus de conversion génère encore davantage de déchets. Les déchets de conversion sont généralement stockés dans de grands complexes à proximité de l'usine de conversion.

En France, par exemple, l'usine de conversion de Comurhex Malvési convertit l' $U_3O_8$  en  $UF_4$ . La transformation en  $UF_6$  se poursuit à l'usine Comurhex de Pierrelatte. Le 20 mars 2004, une rupture de barrage dans un bassin de décantation et d'évaporation à l'usine de conversion de Malvési a conduit au rejet d'environ 30 000 mètres cubes de liquides et de boues. La rupture du barrage aurait été causée par une « présence anormale d'eau » due aux fortes pluies de l'été 2003. La production a dû être interrompue pendant deux mois après les fortes pluies de fin janvier 2006, afin de maintenir la marge de sécurité requise pour l'eau des bassins du complexe. Cependant, l'eau de pluie est entrée en contact avec les boues déversées lors de l'événement de 2004, toujours présentes à l'extérieur des digues, et les contaminants ainsi dissous ont été rejetés dans l'environnement. Le 5 mars 2006, des vents violents ont entraîné le débordement de plusieurs bassins de décantation en raison de marges de sécurité insuffisantes des niveaux d'eau des bassins, entraînant un autre déversement d'eaux contaminées par les nitrates. Le 20 juin 2006, un autre déversement d'une quantité non déclarée de boues contaminées s'est produit. Il a recouvert une superficie de 350 mètres carrés et n'a pas été détecté avant un mois<sup>22</sup>.

La concentration de l'isotope fissile  $^{235}\text{U}$  dans l'uranium naturel n'est que d'environ 0,71%. Pour fabriquer du combustible nucléaire pour la plupart des réacteurs, ce pourcentage doit être augmenté jusqu'à environ 3 à 5%. C'est ce qu'on appelle le processus d'enrichissement. Dans les usines d'enrichissement commerciales existantes, cette opération est effectuée grâce à un procédé physique, soit par diffusion gazeuse, soit par centrifugation. Pour chaque tonne d'uranium enrichi, 7 tonnes d'uranium appauvri (UA) sont générées. Le destin ultime de l'uranium appauvri n'est généralement pas clair, mais la majeure partie est entreposée sous forme d' $\text{UF}_6$  dans des conteneurs en acier, à ciel ouvert, à proximité des usines d'enrichissement. Les États-Unis ont lancé un programme visant à transformer l'hexafluorure d'uranium appauvri en une forme chimique plus adaptée à un entreposage de longue durée.

À la fin de 2005, l'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE estimait que les stocks d'uranium appauvri s'élevaient à environ 1 600 000 tU et qu'ils augmenteraient d'environ 60 000 tU par an<sup>23</sup>.

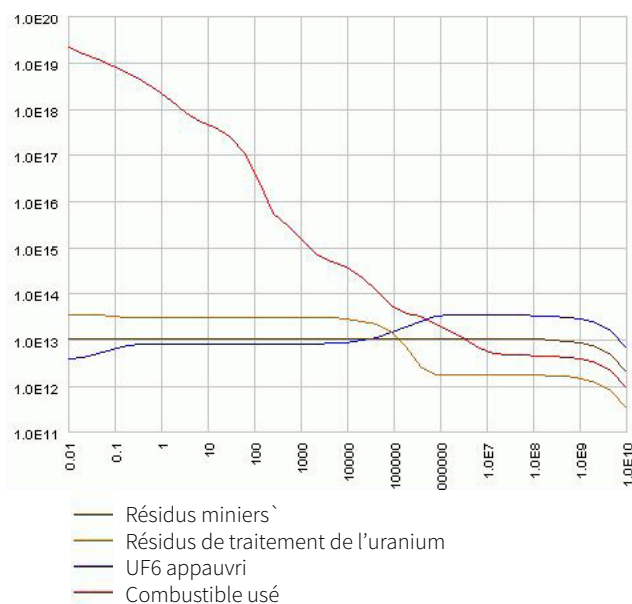
**D'autres estimations, dans certains cas plus récentes, sont données dans un rapport de Galson Sciences pour l'Autorité britannique de démantèlement nucléaire<sup>24</sup>. Celles-ci sont présentées dans le tableau ci-dessous :**

	Année de déclaration	Stocké sous forme de	Stocks en tonnes d'uranium
Chine	1999	$\text{UF}_6$	2 000
France	2010	$\text{U}_3\text{O}_8$ & $\text{UF}_6$	271 000
Allemagne	2005		3 800
Japon	2001	$\text{UF}_6$	10 000
Pays-Bas	2005	$\text{U}_3\text{O}_8$ & $\text{UF}_6$	3 900
Russie	2005	Principalement $\text{UF}_6$	545 000
Afrique du Sud	2000	Principalement $\text{UF}_6$	200
Royaume-Uni	2011	Principalement $\text{UF}_6$ mais également celui qui est extrait du combustible usé lors du retraitement et de divers rebuts et résidus	180 000
États-Unis	2011	$\text{UF}_6$	750 000

L'étape suivante dans la production du combustible nucléaire consiste à convertir l' $\text{UF}_6$  enrichi en dioxyde d'uranium pour l'utiliser dans les barres de combustible nucléaire. De petites quantités de déchets sont produites à ce stade du processus.

Pour illustrer les différentes échelles de temps à prendre en compte, le tableau ci-dessous compare la radioactivité des différents déchets générés chaque année par un réacteur nucléaire de 1 000 MW<sup>25</sup>. Au départ, l'activité du combustible usé est de loin la plus importante, mais elle diminue continuellement. En revanche, la radioactivité de l'uranium appauvri augmente en fait à long terme, de sorte qu'au bout d'un demi-million d'années, elle dépasse celle du combustible usé. (NB : les deux échelles sont logarithmiques).

**Activités [Bq] en fonction du temps [a]**



## LA PRODUCTION D'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'étape suivante dans la chaîne du combustible nucléaire est le chargement du combustible nucléaire dans les réacteurs nucléaires qui produisent alors de l'électricité. En bout de chaîne, ce combustible est déchargé du réacteur sous la forme de combustible nucléaire usé.

En 2011, l'International Panel on Fissile Materials (IPFM) a publié un rapport qui analysait les défis politiques et techniques rencontrés au cours des cinq dernières décennies par les efforts internationaux en matière d'entreposage à long terme et de stockage du combustible usé des réacteurs nucléaires. Ces difficultés ont jusqu'à maintenant empêché l'octroi d'une autorisation à un site de stockage géologique pour des combustibles usés ou des déchets de retraitement de haute activité dans un quelconque pays dans le monde<sup>26</sup>. Ce rapport s'intéresse en particulier à dix pays : l'Allemagne, le Canada, la Corée du Sud, les États-Unis, la France, la Finlande, le Japon, le Royaume-Uni, la Russie et la Suède. Cette liste intègre les plus grands et les plus anciens programmes d'énergie nucléaire et couvre plus de 80 % de la capacité nucléaire mondiale.

Le tableau ci-contre montre l'inventaire du combustible usé dans ces dix pays, tel qu'il était à la fin de 2007. Ce tableau s'appuie sur les rapports les plus systématiques sur les inventaires de combustibles usés par pays, établis par les rapports nationaux exigés par la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs. Le rapport de l'IPFM s'appuie sur les rapports nationaux soumis au cours de la troisième réunion d'examen qui s'est tenue en 2009. La sixième réunion d'examen s'est tenue du 21 mai au 1<sup>er</sup> juin 2018.

Nous examinerons donc les rapports nationaux soumis à cette réunion, lorsqu'ils sont disponibles : <http://www-ns.iaea.org/conventions/results-meetings.asp?s=6&l=40>

Le rapport du Royaume-Uni n'est pas disponible sur le site web de l'AIEA mais est disponible ici : [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/672640/20171020\\_-\\_UK\\_Sixth\\_National\\_Report\\_to\\_the\\_Joint\\_Convention.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/672640/20171020_-_UK_Sixth_National_Report_to_the_Joint_Convention.pdf)

Le rapport suisse est disponible ici : [https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2017/10/Joint\\_Convention-Sixth\\_national\\_report-Switzerland\\_2017.pdf](https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2017/10/Joint_Convention-Sixth_national_report-Switzerland_2017.pdf)

Pays	Inventaire combustible usé (tonnes de métal lourd) à fin 2007	Politique en matière de combustibles usés
Allemagne	5 850	Stockage direct (actuellement)
Canada	38,400	Stockage direct
Corée du Sud	10 900	Entreposage, pas de décision sur le stockage
États-Unis	61 000	Stockage direct
Finlande	1 600	Stockage direct
France	13 500	Retraitement, entreposage et stockage
Japon	19 000	Volonté de retraitement, entreposage actuellement
Royaume-Uni	5 850	Retraitement mais incertitude sur l'avenir
Russie	13 000	Retraitement partiel
Suède	5 400	Stockage direct

Inventaires de combustible usé en piscines de refroidissement et en conteneurs d'entreposage à sec à la fin 2007 pour les dix pays couverts cette étude, à l'exception de France et du Japon. Pour les données portant sur la France et le Japon, voir les chapitres correspondants.

À partir des rapports nationaux soumis à la sixième réunion d'examen de la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et la sûreté de la gestion des déchets radioactifs qui s'est tenue en 2018 (lorsque ces documents sont disponibles) ou, à défaut, de ceux de la cinquième réunion d'examen qui s'est tenue en 2015, il est possible de se faire une idée de l'inventaire des déchets de haute et moyenne activité et du combustible usé dans les principaux pays nucléaires du monde, comme le montre le tableau ci-dessous. Malheureusement, tous les pays n'utilisent pas les mêmes unités de mesure ou la même définition pour les différentes catégories de déchets. Néanmoins, on peut constater qu'il existe maintenant un stock mondial d'environ 250 000 tonnes d'uranium de combustibles irradiés hautement radioactifs répartis dans 14 pays, et environ 370 000 mètres cubes de déchets liquides ou vitrifiés de haute activité.

	Déchets de haute activité	Combustible utilisé	Déchets de moyenne activité	Politiques
<b>Argentine</b> (jusqu'à fin 2013)		4 243 tML		Le combustible utilisé est actuellement entreposé en piscine.
<b>Belgique</b> (au 31 décembre 2016)	600 m <sup>3</sup> – 4 500 m <sup>3</sup> (selon la gestion future du combustible utilisé commercial).	4 080 tML (dont 66 tML de combustible MOX)*	11 100 m <sup>3</sup> – 10 430 m <sup>3</sup> (selon la gestion future du combustible utilisé commercial).	Les réacteurs devraient être arrêtés d'ici 2025. Au 31 décembre 2016, la politique nationale de gestion du combustible utilisé des centrales nucléaires commerciales est l'entreposage sûr suivi de son stockage définitif.
<b>Brésil</b> (mars 2014)		1 398 assemblages de combustible		Le combustible utilisé est actuellement entreposé en piscine.
<b>Canada</b> (au 31 décembre 2016)		52 655 tML	32 891 m <sup>3</sup> (plus 263 m <sup>3</sup> issus des activités de démantèlement)	Stockage direct
<b>Chine</b> (au 31 décembre 2013)		3 973,5 tML		Volonté affichée de choisir le retraitement du combustible utilisé mais ce dernier est pour le moment entreposé.
<b>Finlande</b> (5 <sup>e</sup> examen)(à la fin 2013)		16 382 tML	(y compris le pré-stockage de 2 056 m <sup>3</sup> de déchets de moyenne activité et le stockage de 7 567 m <sup>3</sup> )	Stockage direct (les transports de combustibles usés de Loviisa à Mayak en Russie ont pris fin en 1996)
<b>France</b> (au 31 décembre 2015)	14 555 conteneurs de déchets vitrifiés. Équivalent de 3 200 m <sup>3</sup> équivalent conditionnés fin 2013*	La Hague: 9 681 tML (plus 32 tML étranger) Centrales EDF: 4 221 tML- CEA 88 tML	14 284 conteneurs de déchets métalliques compactés plus 46 300 m <sup>3</sup> qui ne proviennent pas du retraitement.  135 000 m <sup>3</sup> de déchets de moyenne et de faible activité à vie longue.**	Retraitement, entreposage et stockage direct.



	Déchets de haute activité	Combustible utilisé	Déchets de moyenne activité	Politiques
<b>Allemagne</b>	Environ 700 m <sup>3</sup> de déchets vitrifiés dans des conteneurs	20 400 m <sup>3</sup> de combustibles conditionnés provenant de réacteurs à eau légère pour stockage direct;  Environ 1 340 m <sup>3</sup> de combustibles conditionnés provenant du réacteur à haute température au thorium de Hamm-Uentrop.	Environ 740 m <sup>3</sup> d'éléments de structure et de gaines (CSD-C) dans des conteneurs provenant du retraitement des combustibles usés dans des usines de retraitement à l'étranger (France)  Environ 3 400 m <sup>3</sup> de colis de déchets contenant des éléments de structure de combustible usé pour stockage direct	Combustible usé envoyé auparavant au Royaume-Uni et en France pour retraitement. Stockage direct maintenant
<b>Japon</b> (5 <sup>e</sup> Examen) (fin mars 2014)	415 m <sup>3</sup> de déchets liquides de haute activité; 247 conteneurs de 120 litres; 346 conteneurs de 160 litres; 1442 conteneurs de 170 litres	16 889 tML	696 896 fûts de 200 litres dans les centrales et 110 296 ailleurs.	Dans le passé, retraitement à l'étranger, entreposage et volonté de retraitement en échec pour le moment
<b>Russie</b> au 1 <sup>er</sup> janvier 2017	18 640 m <sup>3</sup> de déchets de haute activité liquides plus 480 tonnes de déchets solides de haute activité.	22 449 tML	94 800 m <sup>3</sup> de déchets de moyenne activité liquides plus 1680 tonnes de déchets solides	Retraitement très partiel, entreposage et stockage
<b>Corée du Sud</b> (4 <sup>e</sup> Examen) (fin 2010)		11 370 tML	87 176 fûts de 200 litres dans les centrales (plus 18 228 ailleurs).	Stockage direct
<b>Espagne</b> (octobre 2014)		4 592 tML	7 494 m <sup>3</sup> de déchets de faible et moyenne activité. Plus 30 188 m <sup>3</sup> à El Cabril.	La politique de l'Espagne est que le combustible usé doit être considéré comme un déchet.
<b>Suède</b> (au 31 décembre 2016)		6 758 tML	40 232 m <sup>3</sup> de déchets de faible et moyenne activité	Stockage direct

	Déchets de haute activité	Combustible utilisé	Déchets de moyenne activité	Politiques
<b>Suisse</b> (au 31 décembre 2016)	Environ 1 139 t de combustibles usés ont été expédiées des centrales nucléaires suisses vers les installations de retraitement en France et au Royaume-Uni.	1 377 tML	7 271 m <sup>3</sup> de déchets de faible et moyenne activité conditionnés 1 224 m <sup>3</sup> non conditionnés.	Moratoire sur le retraitement introduit en 2003. Stockage direct.
<b>Royaume-Uni</b> (au 1 <sup>er</sup> avril 2016)	1 960 m <sup>3</sup> (1 100 sous forme liquide, 867 vitrifiés)  3 700 tonnes (1 400 non conditionnées ; 2 300 conditionnées)	Dans les réacteurs? ~ 2 800 tML En entreposage ~ 4 800 tML Déchets futurs résultant des réacteurs existants ~ 2 900 tML Total 10 500 tML	99 000 m <sup>3</sup> (120 000 tonnes)	Le retraitement du combustible Magnox sera terminé en décembre 2020. Le retraitement des combustibles oxydes prendra fin en 2018.
<b>États-Unis</b> (juin 2017)	348 298 m <sup>3</sup>	80 296 tML	91 003 m <sup>3</sup> de déchets TRU (Transuranic waste) générés par les activités de défense et stockés dans le WIPP.	Stockage direct

\* En 2025, lorsque le dernier réacteur nucléaire commercial belge sera arrêté définitivement, la quantité totale de combustible irradié stockée sur les sites de Doel et de Tihange atteindra au maximum 4 880 tML.

\*\* Dans [https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/2015\\_-\\_rapport\\_de\\_synthese.pdf](https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/2015_-_rapport_de_synthese.pdf)

## RETRAITEMENT

Aux débuts de l'industrie nucléaire, l'utilisation du plutonium qui était un sous-produit généré dans les réacteurs nucléaires de première génération, alimentés à l'uranium, est devenue un sujet de fascination pour le monde nucléaire. Au cours du processus de fission nucléaire, une partie de la proportion non fissile de l'uranium – l'uranium 238 – absorbe un neutron en le transformant en plutonium 239. Ce dernier peut être utilisé dans un nouveau type de réacteur – le réacteur surgénérateur. Si le cœur du réacteur est entouré d'une « couverture » d'uranium 238, le surgénérateur peut théoriquement générer davantage de combustible pour sa propre utilisation. Ces réacteurs surgénérateurs pouvaient produire plus de plutonium qu'ils n'en consommaient, ce qui permettait ainsi de prolonger considérablement la durée de vie des réserves d'uranium. Les décideurs ont été impressionnés par ce concept et des fonds de recherche et développement ont été généreusement distribués.

Pour obtenir ce résultat, il fallait séparer le plutonium du combustible nucléaire irradié en le dissolvant dans de l'acide nitrique concentré en ébullition, afin de séparer l'uranium et le plutonium selon un processus appelé retraitement. De nombreux flux de déchets sont créés par ces processus physiques et chimiques, notamment des déchets liquides de haute activité. Des quantités importantes de radioactivité sont également rejetées dans l'atmosphère et le milieu marin. La plupart des rejets de produits de fission et de plutonium issus des programmes nucléaires britannique et français résultent de leurs activités de retraitement. On estime que le retraitement représente à lui seul environ 80 % de la dose de radioactivité reçue par le public (dose collective) du fait de l'industrie nucléaire française. Au Royaume-Uni, on estime qu'environ 90 % des émissions et des rejets de nucléides issus du programme nucléaire britannique résultent d'activités de retraitement <sup>27</sup>.

---

L'idée du retraitement a été un désastre environnemental et financier. Au Royaume-Uni, par exemple, Dounreay, dans l'extrême nord de l'Écosse, où était implanté le centre de recherche britannique sur les réacteurs rapides, est en cours de démantèlement. Entre 2030 et 2033, le site devrait atteindre un « état final intermédiaire ». Cette opération coûtera 192 millions de livres sterling rien que pour l'exercice 2018/19. Le coût total actualisé du démantèlement de Dounreay devrait s'élever à 2,7 milliards de livres sterling<sup>28</sup>.

Le retraitement à Sellafield, dans le nord-ouest de l'Angleterre, touche à sa fin. L'usine THORP (Thermal Oxide Reprocessing Plant), qui retraite les combustibles oxydes des réacteurs avancés refroidis au gaz britanniques et des réacteurs à eau légère en Europe et au Japon, devrait fermer cette année.

Le retraitement à THORP est un échec commercial et industriel<sup>29</sup>. À son ouverture en 1994, British Nuclear Fuels Ltd (BNFL) a déclaré que THORP, qui a coûté 2,8 milliards de livres sterling (3,15 milliards d'euros), avait obtenu des contrats à l'étranger pour un total de 5 334 tonnes de combustible usé provenant de réacteurs à eau légère (REL) au Japon, en Allemagne, en Suisse, en Italie, en Espagne, en Suède, aux Pays-Bas et au Canada. La justification économique a été âprement contestée par les opposants dans la période qui a précédé son ouverture en 1994, quand on prévoyait que l'installation rapporterait environ 9 milliards de livres sterling (10 milliards d'euros) à BNFL et permettrait de « réaliser un bénéfice d'au moins 500 millions de livres [560 millions d'euros] » au cours de ses dix premières années d'exploitation. » En réalité, les contrats de retraitement à l'étranger n'ont pas pu être menés à leur terme en 2003 ; ils ont été achevés presque dix ans plus tard en 2009, avec l'annulation de 20 % de ses commandes, ainsi que de multiples défaillances et accidents de l'installation<sup>30</sup>.

L'usine MOX de Sellafield qui lui était associée n'a pas fonctionné comme prévu en raison de problèmes de conception et a été définitivement arrêtée en 2011<sup>31,32</sup>. L'ancienne usine de retraitement du combustible Magnox, qui retraite le combustible irradié provenant de l'ancienne génération de réacteurs maintenant arrêtée au Royaume-Uni, fermera ses portes en 2020. Sellafield coûtera 2 milliards de livres sterling pour son exploitation en 2018/2019. Au total, le coût du démantèlement de Sellafield devrait s'élever à 120 milliards de livres sterling<sup>33</sup>.

Le dernier rapport publié par le National Audit Office britannique sur Sellafield indique que

**« [...] parmi les installations les plus dangereuses figurent quatre anciens bassins et silos contenant de grandes quantités de matières nucléaires, ainsi que les entrepôts qui abritent la plus grande partie de l'inventaire de plutonium du Royaume-Uni. Sellafield Limited [...] qui gère le travail quotidien sur le site a mis en place cinq programmes de longue durée pour gérer ces risques. Ces programmes prendront des décennies pour leur réalisation, car ils nécessitent la construction de nouvelles installations et la mise au point de technologies spécialement adaptées pour récupérer et traiter les déchets. Par exemple, le silo d'entreposage des déchets de gaines de combustible Magnox [Magnox Swarf Storage Silo], opérationnel depuis 1964, contient des boues issues d'anciennes activités nucléaires à la fois radioactives et corrosives. L'installation devrait présenter un risque important jusqu'en 2050<sup>34</sup>. »**

L'un des anciens bassins – le bassin d'entreposage du combustible usé des Magnox – a été considéré en 2015 comme « le bâtiment industriel le plus dangereux d'Europe ». Le bassin en plein air de 150 mètres de long est visité par les oiseaux et des fissures ont entraîné la fuite de matières radioactives dans le sol. Personne ne sait exactement ce qu'il y a dedans, mais il pourrait contenir une tonne de plutonium<sup>35</sup>.

## PLUTONIUM

Le stock mondial de plutonium séparé s'élève à environ 520 tonnes, dont environ 290 tonnes sont placées sous contrôle civil<sup>36</sup>. On estime qu'il faut environ 8 kg de plutonium de qualité réacteur pour fabriquer une bombe nucléaire<sup>37</sup>.

Pays	Plutonium civil (tonnes)
Russie	57,2
États-Unis	7
Royaume-Uni	110,3
France	65,4
Chine	0,04
Inde	0,4
Japon et autres	49,3
<b>Total</b>	<b>290</b>

Source : <http://fissilematerials.org>

Le Royaume-Uni a accumulé le plus grand stock de plutonium civil au monde. Autrefois considéré comme un atout précieux, il est désormais considéré comme un passif coûteux et une cible pour les terroristes. Selon certaines estimations, le contribuable dépense actuellement 80 millions de livres par an pour assurer la sécurité de son entreposage et l'empêcher de tomber entre de mauvaises mains<sup>38</sup>. La NDA (Nuclear Decommissioning Authority) a indiqué en 2014 que son option privilégiée pour gérer ce passif consistait à le réutiliser dans des réacteurs mais, ajoutent ses membres,

«[...] nous pensons que la compréhension des options permettant de passer à la mise en œuvre est insuffisante.»

Depuis lors, aucune nouvelle annonce n'a été faite par la NDA ou le gouvernement britannique. Selon la NDA, il faudrait 40 ans pour utiliser la totalité du plutonium réutilisable s'il y avait cinq réacteurs à eau légère utilisant du combustible à 30% de MOX (oxyde de plutonium mélangé et oxyde d'uranium). Le délai serait différent en fonction du nombre de réacteurs ou de leurs types, ou avec une autre proportion de MOX<sup>39</sup>.

L'entreposage du MOX usé est beaucoup plus compliqué que celui du combustible usé normal et il doit être refroidi beaucoup plus longtemps, peut-être même pendant un siècle<sup>40</sup>.

Le Japon dispose d'un stock de 47 tonnes de plutonium et fait face des pressions internationales qui cherchent à l'inciter à le réduire avant l'expiration d'un traité sur le nucléaire civil avec les États-Unis. L'incertitude oblige le gouvernement à repenser sa stratégie, qui date de plusieurs décennies et vise à obtenir l'indépendance énergétique grâce à l'utilisation de réacteurs nucléaires et de combustible retraité<sup>41</sup>. Le gouvernement déclare qu'il va renforcer les mesures visant à réduire les surplus de plutonium. Le Japon possède environ 10 tonnes de plutonium dans le pays et 37 tonnes en Grande-Bretagne et en France, c'est-à-dire dans les deux pays qui ont retraité le combustible nucléaire usé nippon. La quantité totale équivaut à environ 6 000 bombes du type de celle qui a dévasté Nagasaki en 1945. Mais la perspective de réduire considérablement les stocks de plutonium du pays devient de plus en plus floue. Le Japon a abandonné son projet de prototype de surgénérateur à Monju. Et sur les neuf réacteurs qui ont repris leurs activités suite à l'introduction de normes de sûreté plus strictes après la catastrophe de Fukushima en 2011, seuls quatre peuvent utiliser du combustible MOX<sup>42</sup>.

À cela s'ajoute le fait que le gouvernement japonais persiste dans ses tentatives de démarrage de l'usine de retraitement de Rokkasho, maintenant prévu pour le premier semestre 2021. La construction a commencé en 1993. Si l'usine de retraitement de Rokkasho est mise en service, elle créera un excédent de huit tonnes de plutonium chaque année<sup>43</sup>.

## ENTREPOSAGE DES COMBUSTIBLES USÉS

Selon l'AIEA, moins d'un tiers des quantités de combustibles irradiés dans le monde ont été retraitées. Le reste est stocké en attendant une décision sur un lieu de stockage définitif, en partie dans des piscines d'entreposage et dans des entreposages à sec.

Après le déchargement du combustible du cœur du réacteur, les produits de fission radioactifs continuent à se désintégrer, générant de la chaleur. Toutes les centrales nucléaires des États-Unis entreposent le combustible sur place au fond de piscines profondes pendant au moins 4 ans, le temps de son lent refroidissement. Aux États-Unis, la majeure partie du combustible nucléaire usé est entreposée dans des piscines spécialement conçues situées sur les différents sites de réacteurs du pays<sup>44</sup>.

---

Toutefois, un incendie provoqué par le combustible usé entreposé dans une centrale nucléaire américaine pourrait avoir des répercussions catastrophiques qui «*pourraient éclipser les terribles conséquences de l'accident de Fukushima*», selon Edwin Lyman, un physicien de l'Union of Concerned Scientists. «*Nous parlons de conséquences qui pourraient s'élever à un milliard de milliards de dollars*», déclare Frank von Hippel, expert en sécurité nucléaire à l'Université de Princeton, qui a fait équipe avec Michael Schoeppner de Princeton pour l'exercice de modélisation.

Dans la plupart des centrales nucléaires américaines, le combustible irradié est placé dans des piscines selon une configuration dense, ce qui augmente les risques d'incendie. La Commission de réglementation nucléaire (Nuclear Regulatory Commission - NRC) a estimé qu'un incendie grave dans la piscine de combustible irradié de la centrale nucléaire de Peach Bottom, en Pennsylvanie, obligerait ou entraînerait le déplacement d'environ 3,46 millions de personnes habitant dans la zone de 31 000 kilomètres carrés de terres contaminées, une superficie supérieure à celle du New Jersey. Mais F. Von Hippel et M. Schoeppner pensent que la NRC a largement sous-estimé l'ampleur et les coûts sociaux d'un tel incendie. Leur modèle laisse penser que 18,1 millions de personnes pourraient avoir à être déplacées<sup>45</sup>.

La NRC a étudié la possibilité d'obliger l'industrie nucléaire à transférer la majeure partie du combustible usé refroidi, actuellement contenu dans des piscines avec entreposage dense, dans des conteneurs d'entreposage à sec en béton. Une telle mesure réduirait les conséquences et la probabilité d'un incendie dans une piscine de combustible usé. Tout récemment en 2013, la NRC a conclu que les avantages attendus ne justifiaient pas le coût d'environ 4 milliards de dollars d'un transfert massif. Mais la NRC a minimisé le risque d'un incendie de combustible usé.

Même en France, où le combustible usé est à terme transporté à La Hague pour y être retraité, il doit d'abord être refroidi dans des piscines. Selon un rapport publié par Greenpeace, ces piscines de combustible usé sont extrêmement vulnérables à des attaques. Ces piscines n'ont pas été conçues pour résister à une attaque. Une attaque entraînant une perte de l'eau de refroidissement pourrait provoquer un incendie de combustible et contaminer des zones situées jusqu'à 250 kilomètres<sup>46</sup>.

Le rapport des experts indépendants, transmis aux autorités françaises, belges, allemandes, suisses et luxembourgeoises, émet des doutes concernant la sécurité des installations nucléaires françaises et belges et souligne leur vulnérabilité aux attaques extérieures. Les auteurs indiquent que ce sont les piscines de stockage de combustible usé qui contiennent le plus grand volume de matières radioactives dans une centrale nucléaire, alors qu'elles sont très mal protégées. Pour eux, plutôt que d'attendre que le pire se produise, il faudrait que le problème soit réglé maintenant. Comme il contient des informations sensibles sur la sécurité des installations nucléaires françaises et belges, le rapport n'a pas été diffusé au grand public. Le rapport estime que les piscines de stockage de combustible irradié constituent le talon d'Achille des centrales nucléaires françaises et belges<sup>47</sup>.

Greenpeace a mis en lumière la vulnérabilité des piscines de combustible usé en écrasant un drone en forme de Superman sur la centrale nucléaire EDF du Bugey, près de Lyon en France. Le drone a pénétré dans la zone interdite de survol entourant la centrale et s'est écrasé contre le mur du bâtiment de la piscine à combustible usé de l'usine<sup>48</sup>.

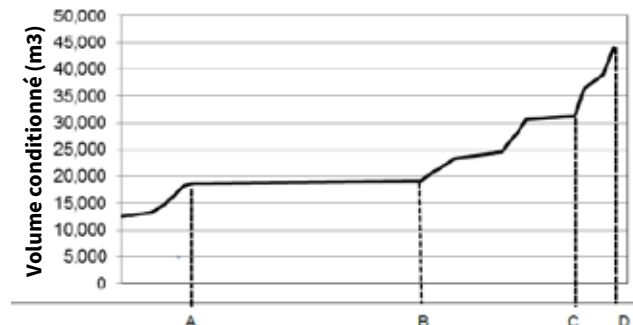
## **DÉMANTÈLEMENT**

La plus ancienne centrale nucléaire des États-Unis, ouverte en 1969, sera fermée le 17 septembre 2018, mais Oyster Creek, dans le New Jersey, va être laissée en l'état pendant 60 ans. Selon la Commission de réglementation nucléaire, le propriétaire de la centrale, Exelon, prévoit de retirer le combustible usé restant dans les piscines de stockage et de le stocker à sec dans les cinq ans et demi qui suivent la date d'arrêt. Au total, la fermeture de la centrale coûtera 1,4 milliard de dollars, mais Exelon ne dispose actuellement que de 982,1 millions de dollars sur un compte de garantie prévu pour le démantèlement. Bien que l'usine cessera de produire de l'électricité juste avant la fin de l'été, des matières radioactives pourraient rester sur place jusqu'à la fin des années 2070, voire plus tard. Le réacteur sera mis en «*cocon sous surveillance*» jusqu'en 2075 et son démantèlement devrait avoir lieu entre 2075 et 2078. Cela permettra aux niveaux de radioactivité de décroître<sup>49</sup>.

La situation est analogue au Royaume-Uni. La centrale d'Hunterston A, par exemple, est située sur la côte à 50 kilomètres au sud-ouest de Glasgow. Les deux réacteurs Magnox ont également démarré en 1969 mais ont cessé leurs activités en 1989, après seulement 20 ans d'exploitation. Le combustible usé a déjà été enlevé et transféré à Sellafield pour retraitement. Les travaux sont toujours en cours pour placer le site en phase de maintenance et de surveillance. Cette opération exige de développer des techniques complexes pour récupérer et conditionner des déchets solides de moyenne activité (principalement le gainage métallique retiré du combustible usé avant son expédition à Sellafield) stockés dans 5 bunkers. Ce processus prendra environ six ans. Les 5 bunkers contiennent environ 2 200 m<sup>3</sup> de déchets solides. Dans le cadre d'un autre projet, l'Installation de récupération et d'encapsulation des déchets de moyenne activité (Wet ILW Retrievals and Encapsulation Plant - WILWREP) est en train de traiter 180 m<sup>3</sup> de boues, 11 m<sup>3</sup> de résines et 141 m<sup>3</sup> d'acide contaminé. WILWREP développe de nouvelles techniques robotiques. Les deux réacteurs seront recouverts d'aluminium et, d'ici 2024, tous les déchets de moyenne activité seront placés dans un entrepôt en surface. Le site entrera ensuite dans une période de maintenance et de surveillance pendant les soixante années suivantes. La phase finale de démantèlement ne devrait pas commencer avant 2070<sup>50</sup>.

Actuellement, la plupart des pays prévoient une période d'entretien et de maintenance pour les anciens réacteurs, afin de permettre à la radioactivité de décroître, et ainsi réduire la dose de rayonnement reçue par les travailleurs avant le démantèlement définitif. Toutefois, les progrès de la robotique et la crainte que les compétences nécessaires ne soient pas disponibles dans 50 ans pourraient changer la donne.

Une représentation graphique de la façon dont les volumes de déchets de moyenne activité devraient apparaître au fil du temps en Écosse met en lumière la longueur des délais qui sont en jeu. Environ les deux tiers de ces déchets ne seront générés qu'après le nettoyage final du site, après 2070. Le gouvernement écossais a pour politique de ne pas autoriser la construction de nouvelles centrales nucléaires.



Source: <https://www2.gov.scot/Resource/0051/00511782.pdf>

A = vers 2030. Des déchets d'exploitation et de démantèlement continueront d'être produits jusqu'en 2030 environ.

B = 2070-85 Début du démantèlement des deux plus anciennes centrales nucléaires d'Écosse, qui ont cessé de fonctionner en 1989 et 2004.

C = 2115. Début du démantèlement des deux centrales nucléaires écossaises les plus récentes, toujours en activité aujourd'hui, dont la fermeture est prévue en 2023 et 2030.

D = 2120. Tous les démantèlements devraient être terminés. Plus aucun déchet de moyenne activité n'est généré.

Le Royaume-Uni a construit 26 réacteurs Magnox sur 11 sites (dont les deux en Écosse) entre 1956 et 1971. Tous ces sites sont maintenant fermés et le travail de démantèlement a été confié à un organisme public, appelé l'Autorité de démantèlement nucléaire (Nuclear Decommissioning Authority - NDA). En 2014, la NDA a attribué un contrat de 14 ans pour le démantèlement de ces réacteurs (ainsi que celui d'un site doté de deux réacteurs expérimentaux uniques en leur genre) à un consortium international, Cavendish Fluor Partnership. Toutefois, deux sociétés américaines qui n'avaient pas pu remporter le contrat, d'un montant de 6,2 milliards de livres, ont contesté le processus d'appel d'offres. En 2017, dans le cadre d'un règlement à l'amiable, 97,3 millions de livres ont été accordées. La NDA a également dépensé 13,8 millions de livres sterling en conseils juridiques et conseillers externes, tandis que le temps de travail du personnel en interne a coûté 10,8 millions de livres sterling. Le coût total de ce processus d'adjudication bâclé s'est donc élevé à 122 millions de livres sterling pour le contribuable<sup>51</sup>. Les ministres ont maintenant résilié leur contrat avec Cavendish Fluor de manière anticipée et décidé de confier de nouveau les travaux de démantèlement à un organisme public<sup>52</sup>.

---

L'une de ces centrales Magnox (avec deux réacteurs), située à Bradwell dans l'Essex, juste à l'extérieur de Londres, en est aux dernières phases de la préparation du site pour une période de maintenance et d'entretien de 80 ans. La centrale a cessé de produire de l'électricité en mars 2002, après 40 ans de fonctionnement. Ainsi, un bébé né aujourd'hui dans la maternité de l'hôpital Colchester pourrait se retrouver avec des petits-enfants ou des arrière petits-enfants qui travaillent au déclassé final et au conditionnement des déchets générés par le démantèlement de l'installation<sup>53</sup>.

La Commission européenne estime que l'Europe fait face actuellement à une facture de 253 milliards d'euros pour la gestion des déchets nucléaires et le démantèlement des installations nucléaires, ce qui dépasse de 120 milliards d'euros les fonds disponibles. Cette somme se répartit entre 123 milliards d'euros pour le démantèlement des anciens réacteurs et 130 milliards d'euros pour la gestion du combustible usé, des déchets radioactifs et des processus de stockage géologique profond<sup>54</sup>. En France, le pays qui exploite le plus grand parc de centrales nucléaires en Europe, les fonds prévus sont très insuffisants. Les actifs qu'elle a réservés ne s'élèvent qu'à 23 milliards d'euros, soit moins d'un tiers des 74,1 milliards de coûts attendus. En Allemagne, 7,7 milliards d'euros supplémentaires sont nécessaires en plus des 38 milliards actuels<sup>55</sup>.

## **LES FUTURS STOCKS DE DÉCHETS NUCLÉAIRES**

En 2003, le gouvernement britannique a mis en place un nouveau comité indépendant – le Comité sur la gestion des déchets radioactifs (CoRWM) – chargé d'examiner les options de gestion des déchets radioactifs et de formuler des recommandations. Trois ans plus tard, le comité a formulé une série de recommandations que le gouvernement a ignorées, pour la plupart. Si le comité estimait que le stockage géologique constituait la meilleure option disponible pour les déchets existants et ceux qui étaient déjà engagés, il ajoutait aussi que « *les problèmes politiques et éthiques posés par la création de déchets supplémentaires sont assez différents de ceux relatifs aux déchets déjà engagés - et donc inévitables* »<sup>56</sup>.

Le comité a plus tard développé sa position et précisé: « Pour justifier la création de nouveaux volumes de combustible usé d'un point de vue éthique, il doit y avoir *une solution de gestion qui est éthiquement correcte, pas simplement moins mauvaise. [...] En bref, une solution qui est éthiquement acceptable pour gérer le combustible usé déjà existant n'est pas nécessairement une solution qui serait éthiquement acceptable pour gérer des matériaux nouveaux ou modifiés* »<sup>57</sup>.

En 2008, le gouvernement britannique a relancé une nouvelle fois la recherche d'un site de stockage en profondeur pour les déchets nucléaires. Le Partenariat pour la sûreté de la gestion des déchets radioactifs en West Cumbria a été créé par trois municipalités dans le nord-ouest de l'Angleterre pour examiner les problèmes qui se poseraient si le West Cumbria participait à la recherche d'un site pour construire un site de stockage de déchets radioactifs de haute activité. Le rapport final du Partenariat a été publié en 2012<sup>58</sup>. Bien que le Conseil du comté de Cumbria ait rejeté les projets du gouvernement visant à entreprendre des travaux préliminaires sur un stockage souterrain de déchets radioactifs au début de 2013, le rapport final du Partenariat énumère un ensemble de principes relatifs à l'inventaire des déchets nucléaires, qui montrent l'importance pour une communauté qui envisage d'accueillir installation de déchets nucléaires de connaître l'inventaire des déchets qu'elle est censée accueillir. Toute « *modification de l'inventaire serait soumise à un processus convenu de modification de l'inventaire* »<sup>59</sup>.

Le programme nucléaire britannique illustre parfaitement la nécessité pour les communautés qui envisagent d'accueillir des stocks de déchets nucléaires d'avoir accès à des informations sur les inventaires correspondants.

La Nuclear Industry Association du Royaume-Uni, par exemple, affirme qu'un « *nouveau parc de centrales nucléaires n'ajouterait que 10% au volume de déchets existants au cours de leurs 60 années de vie* »<sup>60</sup>. Cela laisse entendre que ce volume supplémentaire ne fera pas une différence significative dans la recherche d'un site de stockage souterrain pour les déchets que l'industrie nucléaire britannique a déjà créés. L'utilisation du volume pour mesurer l'impact des déchets radioactifs est cependant très trompeuse.

Le volume n'est pas la meilleure mesure à utiliser pour évaluer l'impact probable des déchets et du combustible usé provenant d'un nouveau programme de réacteurs, en termes de gestion et de stockage. Les nouveaux réacteurs proposés pour le Royaume-Uni, tels que les deux réacteurs prévus à Hinkley point C, utiliseront un « combustible à taux de combustion élevé » qui, lorsqu'il sera utilisé, sera beaucoup plus radioactif que le combustible usé produit par des réacteurs existants tels que Hinkley Point B. Plutôt que d'utiliser le volume comme critère, il serait beaucoup plus approprié de se baser sur la quantité de radioactivité présente dans les déchets. Cela aura une influence, par exemple, sur le volume nécessaire dans un dépôt géologique en profondeur.

Selon Radioactive Waste Management Ltd, la radioactivité provenant des déchets existants (c'est-à-dire sans inclure les nouveaux réacteurs) devrait être de 4 770 000 térabecquerels (TBq) en 2200. La radioactivité du seul combustible usé (à l'exclusion des autres types de déchets) générée par un programme de 16 GW de nouveaux réacteurs devrait être d'environ 19 000 000 TBq. La quantité de radioactivité contenue dans le seul combustible usé de Hinkley Point C en 2200 serait de 3 800 000 TBq, soit environ 80 % de la radioactivité contenue dans les déchets existants<sup>61</sup>.

## UTILISATION DE SCÉNARIOS POUR L'ESTIMATION DES FUTURS STOCKS

Afin d'estimer les volumes de déchets qui devraient être générés du fait de l'exploitation du parc actuel d'installations nucléaires, la soumission de l'Espagne à la cinquième Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs, présente un scénario dans lequel le parc actuel de six centrales nucléaires (huit réacteurs - 7,7 GWe) fonctionnerait pendant une durée de 40 ans.

Plusieurs autres pays ont fait la même chose, soit dans des communications à la Convention de l'AIEA, soit dans d'autres rapports. Le tableau ci-dessous donne les informations actuellement disponibles.

	Hypothèses	Déchets de faible et moyenne activité à vie courte	Déchets de faible et moyenne activité à vie longue	Déchets de haute activité y compris combustible usé
<b>Belgique</b>	7 réacteurs fermant tous entre octobre 2022 et décembre 2025. (Extrait du rapport national octobre 2017)	70 500 m <sup>3</sup>	11 100 m <sup>3</sup> – 10 430 m <sup>3</sup>	600 m <sup>3</sup> – 4 500 m <sup>3</sup> (selon la gestion future du combustible usé commercial).
<b>Canada</b> (estimation le 27 novembre 2015)	L'inventaire des déchets radioactifs prévus pour 2050, considéré comme la fin de l'exploitation des derniers réacteurs construits, s'appuie sur l'hypothèse qu'aucun nouveau réacteur nucléaire n'a été mis en service.	Déchets FA 2 570 000 m <sup>3</sup>	Déchets MA 79 000 m <sup>3</sup>	21 300 m <sup>3</sup> (104 000 tML prévus en décembre 2016)
<b>Finlande</b>	Inventaire projeté de déchets radioactifs, tenant compte de l'exploitation d'OL3 et Fennovoima pendant 60 ans.			8 300 tML



<b>France</b>	Déchets produits par toutes les installations autorisées fin 2013 jusqu'à leur fin de vie, y compris leur démantèlement – deux scénarios (1) la durée de vie du réacteur est de 50 ans; tout le plutonium est recyclé. (2) durée de vie des réacteurs de 40 ans; fin du retraitement en 2019.	(1) 1 900 000 m <sup>3</sup> (2) 1 800 000 m <sup>3</sup>	(1) 252 000 m <sup>3</sup> (2) 245 000 m <sup>3</sup>	Déchets vitrifiés (1) 10 000 m <sup>3</sup> (2) 3 900 m <sup>3</sup> (Dans le scénario 2, il y aurait également environ 89 000 m <sup>3</sup> de combustible usé conditionné et de MOX)
<b>Espagne</b>	8 réacteurs - 7,7 GWe fonctionnant pendant une durée de vie de 40 ans. (Estimation décembre 2013)	181 091 m <sup>3</sup> (y compris déchets TFA)	855 m <sup>3</sup>	6 704 m <sup>3</sup> de combustible irradié plus 12 m <sup>3</sup> de déchets HA.
<b>Suède</b>	Les centrales nucléaires restantes sont censées fonctionner pendant 60 ans jusqu'en 2040-2045.	153 200 m <sup>3</sup>	16 400 m <sup>3</sup>	11 404 tML
<b>Suisse</b>	5 réacteurs avec une durée de vie de 47 ans - Mühleberg; 60 ans pour les autres. Au final, environ 4 100 tonnes de combustible usé, dont 1 140 tonnes retraitées. Les assemblages de combustible usé et les déchets de haute activité conditionnés auront un volume d'environ 9 400 m <sup>3</sup> .	Déchets FA/MA conditionnés - 81 760 m <sup>3</sup> (y compris industrie et médecine)	Déchets alpha-toxiques 1 072 m <sup>3</sup>	9 400 m <sup>3</sup>
<b>Royaume-uni</b>	Le programme de nouveaux réacteurs (« New Build ») suppose l'ajout de 16 GW.	11 800 m <sup>3</sup> de déchets FA	415 000 m <sup>3</sup> de déchets MA liés aux réacteurs existants 41 000 m <sup>3</sup> de déchets MA liés aux nouveaux réacteurs.	9 290 m <sup>3</sup> de déchets HA et 14 800 m <sup>3</sup> de combustible usé provenant des réacteurs existants. 39 400 m <sup>3</sup> de combustible usé provenant des nouveaux réacteurs
<b>États-Unis</b>				140 000 tML Déchets HA générés par les activités de défense: 90 millions de gallons (340 millions de litres) de liquides, boues et solides de déchets de haute activité <sup>71</sup> .

# CONCLUSION

---

**Actuellement, dans le monde entier, on peut estimer que les stocks de déchets nucléaires sont les suivants :**

- 2,4 milliards de tonnes de résidus de traitement de l'uranium.
- 1 188 200 tonnes (tU) d'uranium appauvri (en 1999, avec une augmentation de 60 000 tU par an), ce qui pourrait correspondre aujourd'hui à environ 2 millions de tonnes.
- 246 686 tML de combustibles usés dans 14 pays; l'AIEA estime que 370 000 tML de combustibles usés ont été produits depuis le début de la production électronucléaire civile, dont 120 000 tML ont été retraitées.
- 373 313 m<sup>3</sup> de déchets liquides de haute activité.
- un stock mondial de plutonium de 520 tonnes.

- 
- 1 Allan Hedin « Spent nuclear fuel – how dangerous is it? A report from the project ‘Description of risk’ » SKB Report - Technical Report TR-97-13 (mars 1997)  
[https://inis.iaea.org/search/search.aspx?origi\\_q=RN:29015601](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?origi_q=RN:29015601)
  - 2 Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management, IAEA Nuclear Energy Series, N° NW-T-1.14 2018  
[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1799\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1799_web.pdf)
  - 3 Voir <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>
  - 4 Paladin Energy, 25 mai 2018, ‘LHM Confirmation of Care & Maintenance’,  
<https://www.asx.com.au/asxpdf/20180525/pdf/43v8z12d7zf1r0.pdf>
  - 5 Nuclear Monitor #847, 21 juillet 2017, ‘Paladin Energy goes bust’,  
<https://www.wiseinternational.org/nuclear-monitor/847/paladin-energy-goes-bust>
  - 6 Market Wired 7 février 2014, Paladin Energy Ltd. ‘Suspension of Production at Kayelekera Mine, Malawi’, <http://www.marketwired.com/press-release/paladin-energy-ltd-suspension-of-production-at-kayelekera-mine-malawi-tsx-pdn-1876805.htm>
  - 7 Mining Technology, 30 avril 2018, ‘Paladin begins consultations to place LHM mine on care and maintenance’,  
[www.mining-technology.com/news/paladin-begins-consultations-place-lhm-mine-care-maintenance/](http://www.mining-technology.com/news/paladin-begins-consultations-place-lhm-mine-care-maintenance/)
  - 8 Green, J. Paladin Energy puts second African uranium mine into care-and-maintenance, Nuclear Monitor #862, juin 2018
  - 9 Pour des informations récentes sur Arlit, voir *African Arguments* 18 juillet 2017  
<http://africanarguments.org/2017/07/18/a-forgotten-community-the-little-town-in-niger-keeping-the-lights-on-in-france-uranium-arlit-areva/>
  - 10 Left in the Dust, AREVA’s radioactive legacy in the desert towns of Niger, Greenpeace International 2010  
<https://www.greenpeace.org/denmark/Global/denmark/p2/other/report/2010/left-in-the-dust.pdf> Voir également <https://www.youtube.com/watch?v=ioRtzOWm07A>
  - 11 History and consequences of uranium mining in Niger from 1969 to 2017 par Almoustapha Alhacen, Arlit, Niger.  
[https://static1.squarespace.com/static/58bd8808e3df28ba498d7569/t/59bd250780bd5e7ca76585f3/1505568010268/Almoushapha\\_20170910\\_+English\\_HN.pdf](https://static1.squarespace.com/static/58bd8808e3df28ba498d7569/t/59bd250780bd5e7ca76585f3/1505568010268/Almoushapha_20170910_+English_HN.pdf)
  - 12 Anwar, T. *Uranium Mining in Jharkhand: Radioactive Poisoning Ravaging Lives in Villages*, Newsclick, 21 juin 2018  
<https://newsclick.in/uranium-mining-jharkhand-radioactive-poisoning-ravaging-lives-villages>
  - 13 Sunday Times, 7 février 2010 <https://www.thetimes.co.uk/article/the-great-uranium-stampede-c7p3m6h9xxd>
  - 14 Association nucléaire mondiale (WNA) juillet 2017  
<http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/uranium-production-figures.aspx>
  - 15 Voir diapo 8 <http://www.wise-uranium.org/stk.html?src=stkd01e>
  - 16 Hoppin, G. Rydberg, J. Liljenzin, J.O. Radiochemistry and Nuclear Chemistry, Butterworth, Heinmann, Oxford 1995
  - 17 Pour plus d’informations, voir *Uranium Mining and Milling Wastes: An Introduction* by Peter Diehl  
<http://www.wise-uranium.org/uwai.html>
  - 18 Federal Register / Vol. 48, N° 196 / Vendredi 7 octobre 1983 / Voir page 45929.
  - 19 Voir Chronology of Uranium Tailings Dam Failures,  
<http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>
  - 20 <http://www.wise-uranium.org/uwai.html>
  - 21 Voir la diapositive n° 61 <http://www.wise-uranium.org/stk.html?src=stkd01e>
  - 22 <http://www.wise-uranium.org/stk.html?src=stkd02e>

- 
- 23 Uranium 2016: Resources, Production and Demand, NEA & IAEA, OECD 2016,  
<https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>
- 24 S. Doudou et E.J. Harvey, Review of UK and Overseas Depleted, Natural and Low Enriched Uranium Management, Galson Sciences, 2014  
<https://rwm.nda.gov.uk/publication/review-of-uk-and-overseas-depleted-natural-and-low-enriched-uranium-management/?download>
- 25 WISE Uranium Project, Slide Talk, Nuclear Fuel Production (Conversion, Enrichment, Fuel Prod.), mars 2007, diapositive n° 22  
<http://www.wise-uranium.org/stk.html?src=stkd02e>
- 26 Harold Feiveson, Zia Mian, M.V. Ramana and Frank von Hippel (Eds) Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors Experience and Lessons from Around the World, IPFM, septembre 2011  
<http://fissilematerials.org/library/rr10.pdf>
- 27 Possible Toxic Effects from the Nuclear Reprocessing Plants at Sellafield (UK) and Cap de la Hague (France), European Parliament Scientific and Technological Options Assessment, novembre 2001  
<http://www.wise-paris.org/english/reports/STOAFinalStudyEN.pdf>
- 28 NDA Annual Report 2016/17  
<https://www.gov.uk/government/publications/nuclear-decommissioning-authority-annual-report-and-accounts-2016-to-2017>
- 29 Martin Forwood, “The Legacy of Reprocessing in the United Kingdom”, Research Report No. 5 International Panel on Fissile Materials, July 2008, <http://corecumbria.co.uk/wp/wp-content/uploads/2016/02/CORE-for-IPFM.-Legacy-of-Reprocessing.-July-2008.pdf>
- 30 References – Martin Forwood, with Mycle Schneider, 1,000 tonnes of THORP contracts abandoned since 1994, 6 août, 2014, IPFM, [http://fissilematerials.org/blog/2014/08/1000\\_tons\\_of\\_thorp\\_contra.html](http://fissilematerials.org/blog/2014/08/1000_tons_of_thorp_contra.html) Martin Forwood, Sellafield’s ageing THORP plant flunks major foreign fuel reprocessing target, 6 novembre 2015, [http://fissilematerials.org/blog/2015/11/\\_sellafields\\_ageing\\_thorp.html](http://fissilematerials.org/blog/2015/11/_sellafields_ageing_thorp.html)
- 31 Fundamental Deficiencies in the Quality Control of Mixed-Oxide Nuclear Fuel, Dr Frank Barnaby/Shawn Burnie, Greenpeace International, Fukushima City, Japan, 27 mars 2000
- 32 Sellafield MOX Plant (SMP) axed by Fukushima fallout – says NDA, août 2011, <http://corecumbria.co.uk/news/sellafield-mox-plant-smp-axed-by-fukushima-fallout-says-nda/>
- 33 NDA Annual Report 2016/17  
<https://www.gov.uk/government/publications/nuclear-decommissioning-authority-annual-report-and-accounts-2016-to-2017>
- 34 The Nuclear Decommissioning Authority progress with reducing risk at Sellafield, NAO, 20 juin 2018  
<https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2018/06/The-Nuclear-Decommissioning-Authority-progress-with-reducing-risk-at-Sellafield.pdf>
- 35 Pearce, F, Shocking state of world’s riskiest nuclear waste site, New Scientist, 21 janvier 2015  
<https://www.newscientist.com/article/mg22530053.800-shocking-state-of-worlds-riskiest-nuclear-waste-site/>
- 36 International Panel on Fissile Materials, Fissile Material Stocks 12 février 2018, <http://fissilematerials.org/>
- 37 Miller, M. M., Are IAEA Safeguards on Plutonium Bulk-Handling Facilities Effective? Nuclear Control Institute, Washington, DC., août 1990.  
<http://www.nci.org/k-m/mmsgds.htm>
- 38 Rob Broomby UK’s plutonium stockpile dilemma, BBC 24 février 2013  
<https://www.bbc.co.uk/news/uk-21505271>
- 39 House of Commons Library, UK Parliament, Briefing Paper Number CBP 8176, « New Nuclear Power » 28 juin 2018  
<http://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/CBP-8176/CBP-8176.pdf>
- 40 MoX myths, WISE International, 11 avril 1997  
<https://www.wiseinternational.org/nuclear-monitor/469-470/5-mox-myths-only-lies>
- 41 FT 25 juin 2018  
<https://www.ft.com/content/9d245eca-7781-11e8-bc55-50daf11b720d>
- 42 Asahi Shimbun 17 juin 2018 <http://www.asahi.com/ajw/articles/AJ201806170027.html>

- 
- 43 Beyond Nuclear International - 17 juin 2018  
<https://beyondnuclearinternational.org/2018/06/17/all-that-would-be-destroyed-reprocessing-japan/>
- 44 Voir <https://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage.html>
- 45 Stone, R. Spent fuel fire on U.S. soil could dwarf impact of Fukushima, Science 24 mai 2016,  
<http://www.sciencemag.org/news/2016/05/spent-fuel-fire-us-soil-could-dwarf-impact-fukushima> et Frank N. von Hippel et Michael Schoeppner  
« Reducing the Danger from Fires in Spent Fuel Pools » Science and Global Security, 2016, Vol. 24, n° 3, pp.141-173  
<http://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs24vonhippel.pdf>
- 46 <https://www.greenpeace.fr/espace-presse/dossier-de-presse-securite-reacteurs-nucleaires-piscines-dentreposage-combustible-2017/>
- 47 <https://www.greenpeace.fr/espace-presse/dossier-de-presse-securite-reacteurs-nucleaires-piscines-dentreposage-combustible-2017/>
- 48 <https://www.greenpeace.fr/action-superman-survole-crash-centrale-nucleaire-bugey/>
- 49 Daily Mail 2 juillet 2018  
<http://www.dailymail.co.uk/wires/ap/article-5910093/Oldest-US-nuke-plant-New-Jersey-shutter-September.html>
- 50 Implementation strategy for Scotland's policy on higher activity radioactive waste, Scottish Government, décembre 2016  
<http://www.gov.scot/Resource/0051/00511782.pdf>
- 51 Guardian - 11 octobre 2017  
<https://www.theguardian.com/politics/2017/oct/11/watchdog-slams-nuclear-cleanup-contract-that-cost-public-122m>
- 52 Guardian - 2 juillet 2018  
<https://www.theguardian.com/politics/2018/jul/02/uk-nuclear-cleanup-contract-back-in-public-hands-after-122m-bill>
- 53 Maldon & Burnham Standard 23 juillet 2018  
<http://www.maldonandburnhamstandard.co.uk/news/16371458.bradwell-power-station-finishes-treating-radioactive-waste/>
- 54 Guardian 4 avril 2016  
<https://www.theguardian.com/environment/2016/apr/04/europe-faces-253bn-nuclear-waste-bill>
- 56 Reuters 16 février 2016  
<https://uk.reuters.com/article/uk-europe-nuclear-idUKKCN0VP2KN>
- 56 Managing our Radioactive Waste Safely, CoRWM, juillet 2006. Para. 26.  
[https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/294118/700\\_-\\_CoRWM\\_July\\_2006\\_Recommendations\\_to\\_Government\\_pdf.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/294118/700_-_CoRWM_July_2006_Recommendations_to_Government_pdf.pdf)
- 57 Re-iteration of CoRWM's Position on Nuclear New Build, Gordon Mackerron, septembre 2007. Page 3  
<http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20130717140311/>  
[http://corwm.decc.gov.uk/assets/corwm/pre-nov%202007%20doc%20archive/doc%20archive/tier%20%20\(7\)%20-%20implementation/tier%203%20-%20implementation%20advice/2162%20%20-%20corwm%20position%20on%20new%20build%20reiterated.pdf](http://corwm.decc.gov.uk/assets/corwm/pre-nov%202007%20doc%20archive/doc%20archive/tier%20%20(7)%20-%20implementation/tier%203%20-%20implementation%20advice/2162%20%20-%20corwm%20position%20on%20new%20build%20reiterated.pdf)
- 58 Final report of the West Cumbria Managing Radioactive Waste Safely Partnership, WCMRWS 16 août 2012.  
[http://www.westcumbriamrws.org.uk/documents/306-The\\_Partnership's\\_Final\\_Report\\_août\\_2012.pdf](http://www.westcumbriamrws.org.uk/documents/306-The_Partnership's_Final_Report_août_2012.pdf)
- 59 Ibid, voir page 78.
- 60 Site web de la Nuclear Industry Association consulté le 9 juillet 2018  
<https://www.niauk.org/industry-issues/waste-management/>
- 61 An overview of the differences between the 2013 Derived Inventory and the 2010 Derived Inventory, RWM Ltd, juillet 2015  
<https://rwm.nda.gov.uk/publication/differences-between-2013-and-2010-derived-inventory/>

2

**BELGIQUE**

# PROJET MOL

## — BELGIQUE *Bertrand Thuillier*

---

### INTRODUCTION

La question de l'enfouissement des déchets nucléaires est un sujet éminemment complexe de par ses différentes composantes scientifiques, techniques, éthiques, politiques et sociologiques, et ses implications temporelles d'une centaine d'années pour la période d'exploitation, à des centaines de milliers d'années, a minima, en situation de fermeture correspondant aux durées de dangerosité de ces déchets.

Cet article a pour objectif dans un premier temps de faciliter la compréhension du projet d'enfouissement de Mol (Nord-Est de la Belgique) dans une couche d'argile, dite de Boom, avec la description de ses trois principaux éléments constitutifs : Les déchets à enfouir - La roche hôte - Les infrastructures souterraines envisagées.

Cette description permettra ensuite d'approcher par leurs liens et par leurs interactions respectives, les conséquences et les risques que leurs effets entraînent sur la sécurité et sur la migration des radioéléments vers les couches aquifères supérieures. Ensuite, une synthèse de ces risques et des incertitudes permettra alors d'énoncer quelques enseignements constructifs face à cette complexité.

# DESCRIPTION DU PROJET D'ENFOUISSEMENT DE MOL

## LES DÉCHETS CONCERNÉS

### — VOLUMES

Deux catégories de déchets sont concernées par ce projet, les déchets de type B (équivalent Moyenne Activité), et des déchets de type C (équivalent Haute Activité).

En raison des dispositions de la loi du 31 janvier 2003 interdisant la construction et la mise en exploitation de nouveaux réacteurs commerciaux, et la fermeture des sept existants après une période d'exploitation de 40 ans<sup>1</sup>, il est ainsi possible de dresser un début d'inventaire assez délimité des volumes qui seront à gérer (contrairement à la France, par exemple):

- 10 430 à 11 100 m<sup>3</sup> de déchets de catégorie B (environ 2 % de la radioactivité totale des déchets)<sup>2</sup> – Il est à ajouter cependant qu'une partie des 85 000 m<sup>3</sup> de déchets non conditionnés et stockés à Olen (Umicore 2011) pourrait largement augmenter ce volume<sup>3</sup>.
- 4 500 m<sup>3</sup> de catégorie C (environ 97,5% de la radioactivité totale des déchets) – Il est à noter que nous considérons dans ces volumes également les combustibles usés qui doivent être considérés comme des déchets, de par l'arrêt du programme nucléaire belge (cf. ci-dessus), de par la suspension par la Belgique du retraitement de ses déchets en 1993<sup>4</sup> et confirmé en 1998<sup>5</sup>, et enfin par l'interprétation de la directive Européenne du 19 juillet 2011 sur les déchets nucléaires du terme 'Déchets' « considérant le combustible usé comme un déchet »<sup>6</sup>.

### — PROPRIÉTÉS

Selon le type de déchets (B ou C), et la classe de ces derniers, quatre de leurs propriétés vont jouer des rôles importants dans l'évolution de l'installation, et particulièrement dans un environnement souterrain :

#### Présence de bitume

Cette propriété concerne seulement les déchets de type B<sup>7</sup>, et plus particulièrement 47 % de ceux-ci en nombre (16 600 sur 35 000 environ) en fût acier constitués d'une matrice bitume. Ce mode d'enrobage (60% de bitume pur)<sup>8</sup> n'est désormais plus utilisé car, outre le fait que le bitume soit un élément très combustible avec au total de l'ordre de 3 200 tonnes de bitume pur (risque d'incendie), cette matrice en présence de sels et sous irradiation (400 à 5000 Gy/h en débit de dose) peut gonfler jusqu'à 70 % de son volume initial<sup>9</sup>. Cette expansion est liée à la génération de bulles d'hydrogène issues de la radiolyse des matières organiques de la matrice.

#### Génération d'hydrogène

Ces mêmes déchets de type B peuvent également générer de volumes conséquents d'hydrogène et relâcher également des gaz radioactifs (Tritium, Krypton<sub>85</sub>, Carbone<sub>14</sub>, Chlore<sub>36</sub>) comme mentionné dans les dossiers de l'Andra<sup>10</sup>; en effet, dans les inventaires Andra pour ces fûts normalisés (Eurobitumen), il est à noter que ceux-ci peuvent rejeter par colis et par an en moyenne 10L H<sub>2</sub>, soit un **total de 150 à 200 m<sup>3</sup> d'hydrogène par an** - Mais certains colis par la présence d'eau et des matières organiques présentes, sous l'action de la radiolyse, peuvent atteindre jusqu'à 500 L H<sub>2</sub>/fût/an<sup>11</sup>.

#### Puissance calorifique

Cette caractéristique concerne maintenant les déchets de type C, qui sont essentiellement constitués de combustibles usés classe ZAGALS UOX (10 250 sur 11 000 environ)<sup>12</sup>; ces colis sont en effet fortement exothermiques et constituent de véritables petits radiateurs, leur puissance thermique (en Watts par colis) décroît en fonction du temps, de l'ordre de 1000 à 1400 W au bout de 20 ans, **400 à 600 W au bout de 60 ans**; il est néanmoins nécessaire de considérer leur composition en plutonium et en américium dont la décroissance thermique s'avère plus lente<sup>13</sup>. On peut en effet ajouter que les colis à base de MOX (144) décrits par l'Andra (CU2/MOX) conservent une puissance thermique de **1 100 W après un entreposage de 90 ans** après la sortie du réacteur<sup>14</sup>.

#### Matières fissiles

La masse de matières fissiles résiduelles en sortie de réacteur, et toujours selon la description des dossiers de l'Andra est de l'ordre de 10 kg dont 4 à 5 kg d'<sup>235</sup>U et moins de **4 kg de <sup>239</sup>Pu** par colis de combustibles usés de type UOX, mais celle-ci peut atteindre environ 20 kg avec **près 12 kg de <sup>239</sup>Pu**, toujours par colis de combustibles usés<sup>15</sup>. Il est en effet nécessaire à rappeler que la masse critique du <sup>239</sup>Pu s'établit à 510g. Il sera par conséquent indispensable de s'assurer en fonction des taux de combustion et que la disposition des assemblages reste bien des conditionnements en situation de sous-criticité (pour éviter une réaction en chaîne nucléaire).

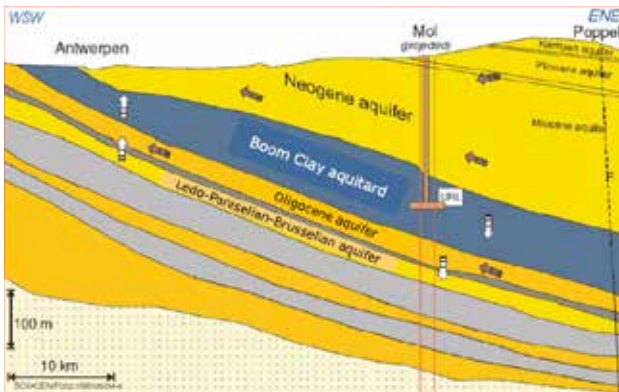


## LA ROCHE HÔTE (L'ARGILE DE BOOM)

### — SITUATION

L'argile de Boom est une formation sédimentaire déposée, il y a environ 30 millions d'années avec un pendage de 1 à 2 % vers le nord-est et une épaisseur de 100 m environ, située entre 190 à 290 m en-dessous de la surface de Mol-Dessel, avec une épaisseur et une profondeur d'autant plus importantes que l'on se rapproche de la frontière des Pays-Bas<sup>16</sup>.

Cette couche imperméable se situe, de par cette propriété, juste en-dessous d'une couche de sables du Néogène, second aquifère en importance pour le captage d'eau potable en Belgique, et le principal pour cette partie Nord-Est du pays (figure notée 45)<sup>17</sup>.



### — CARACTÉRISTIQUES

#### Plasticité

Cette argile reste une roche très plastique, non autopor-teuse (à l'inverse du granit, par exemple), c'est-à-dire qui nécessite des soutènements très importants lors de son creusement afin d'éviter des rétractions et des éboulements, et par conséquent, oblige à des quantités très importantes de béton et à une nécessité de structures métalliques très conséquentes (par exemple, des centaines de milliers de tonnes dans le projet Cigéo en France, de l'ordre de 5 fois plus important en terme de volume de déchets prévus à enfouir) pour son maintien.

#### Présence d'eau

Cette roche est saturée en eau avec une proportion d'eau de l'ordre de 19 % à 24 % en poids<sup>18</sup>. Ce point est très important à deux titres ; en effet cette composition est à l'origine des phénomènes de retraits et de crevasses en fonction des degrés de désaturation, liés en particulier à la ventilation. D'autre part, il est à rappeler qu'en présence de forts rayonnements, les molécules d'eau sont cassées (radiolyse) en deux radicaux : H<sup>+</sup> et OH<sup>-</sup> qui vont pouvoir ensuite se recombiner au hasard en différentes molécules comme en hydrogène gazeux (H<sub>2</sub>), en eau oxygénée (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ... pour former ainsi des composés très oxydants et très réducteurs ; tous ces composés vont ensuite être amenés à attaquer très fortement les métaux, qui par réaction, vont également produire de l'hydrogène gazeux (H<sub>2</sub>) lors de cette intense corrosion des structures métalliques.

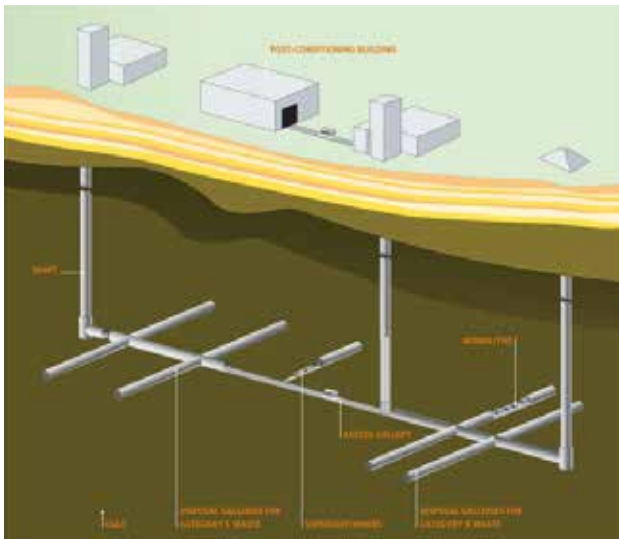
#### Température

Deux contraintes de températures sont à respecter, d'une part, la roche ne doit en aucun cas dépasser des températures de 90°C/100°C pour des raisons évidentes de changement de structure et de perméabilité (vapeur d'eau et cuisson). D'autre part, la température en limite des sables et de l'argile se situe actuellement entre 14 et 15°C ; une augmentation de température 10°C serait alors très dommageable à la qualité et à la potabilité des eaux, 25°C étant en effet une limite réglementaire pour éviter le développement des bactéries du genre legionella<sup>19</sup>.

## LES INFRASTRUCTURES DE STOCKAGE

### — CONCEPTION

Les installations sont prévues pour être placées à une profondeur d'environ 240 m avec 3 puits d'accès et de ventilation de 6 m de diamètre, dont un puits central dédié spécifiquement à la descente des colis. Ces puits devront être impérativement étanches durant toute la durée de l'exploitation et de la fermeture, ayant à traverser les sables aquifères, comme mentionnés précédemment. Ces puits sont ensuite reliés dans leur partie souterraine par une galerie centrale d'accès aux galeries de stockage (cf. figure notée 14)<sup>20</sup>.



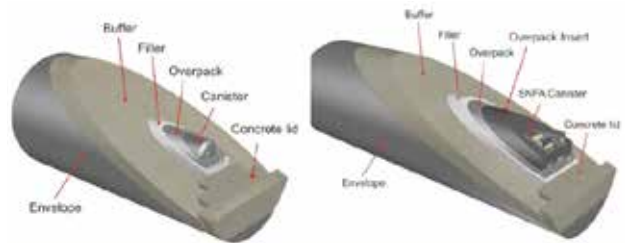
Cette galerie centrale est rectiligne monotube d'environ 6 m de diamètre, et d'un kilomètre de long.

Les galeries de stockage de 3 m de diamètre, d'un kilomètre au maximum sont reliées perpendiculairement à la galerie centrale, et séparées entre elles de 50 à 120 m, un sol au béton et des rails sont envisagés pour l'acheminement des colis sous forme de super-containers.

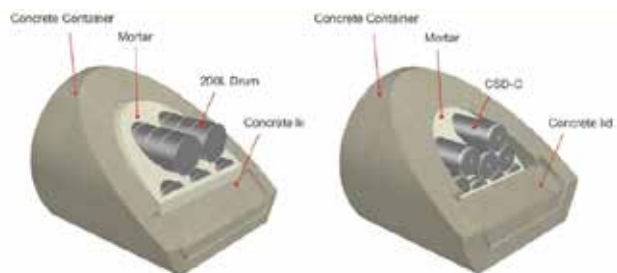
Ces galeries sont borgnes dans leur extrémité opposée à la galerie centrale<sup>21</sup>. La longueur totale cumulée de ces galeries sera d'une trentaine de kilomètres sur une surface totale d'environ 3,1 km<sup>2</sup> ; ces dernières recevront alors ces super-containers, construits en surface. On pourra se reporter à la figure notée 14 ci-dessus pour le schéma de cette architecture<sup>22</sup>.

Les super-containers sont des assemblages contenant les colis de déchets de 4 m à 6,2 m de long, de 2,1 m de diamètre, et d'une masse de 70 tonnes pour les plus importants.

- Les super-containers de type C sont constitués de 1 à 4 colis primaires (1 ensemble MOX, ou 2 colis vitrifiés ou 4 ensembles UOX) insérés dans une enveloppe de 30 millimètres d'acier inoxydable, puis entourés de bentonite, d'une couche de béton, et au final d'une nouvelle enveloppe d'acier (figure notée 11)<sup>23</sup>.



- Les super-containers de type B sont constitués de colis primaires (de 1 à 12 colis ou fûts) immobilisés dans du béton (figure notée 13)<sup>24</sup>.



Le retrait des super-containers n'a pas été envisagé dans cette conception (pas de récupérabilité), les galeries étant scellées au fur et à mesure de leur remplissage.

## CONSTATS

Quatre éléments étrangers sont insérés dans ce milieu souterrain : le béton, l'acier, l'air de ventilation, et en cas de perte d'étanchéité des puits, de l'eau qui sera à relever au moins durant la partie exploitation.

### Etanchéité

C'est un problème complexe lié à la traversée des sables aquifères ; cela a demandé la mise en place d'une double structure en béton insérant une couche de polyéthylène imperméable complétée d'asphalte et d'acier lors de la construction industrielle du second puits du laboratoire HADES (laboratoire situé à -225 m mis en place en 1980 pour étudier à l'enfouissement dans cette couche d'argile). Il faut savoir que ce second puits nécessite déjà, suite à des fuites d'asphalte, de réinjecter continuellement ce matériau imperméable pour conserver cette étanchéité<sup>25</sup>. La perte de cette étanchéité, et sans un système de pompes de relevage, pourrait alors entraîner un ennoyage complet de l'installation (envahissement par l'eau) en absence d'évacuation en partie souterraine du fait de l'imperméabilité de l'argile.

### Manutention

Sous réserve d'ajustement de conception, Il apparaît que le diamètre prévu du puits de descente des colis semble peu compatible avec le diamètre et la longueur des super-containers pour permettre un chargement directement en position horizontale sur les convoyeurs en fond de puits ; il apparaît par conséquent indispensable de prévoir une chambre de réception conséquente en fond de puits pour permettre ces chargements d'orientation, rendus délicats par la masse manipulée (70 tonnes). Il semble également difficile de comprendre comment sont effectués des tournants en angle droit de ces convoyeurs sur rails pour accéder aux galeries de stockage, sans mettre en place des plateformes, et par conséquent de nouvelles chambres conséquentes, à préciser, pour chaque intersection<sup>26</sup>.

### Sécurité

Sous réserve également de ne pas disposer des derniers schémas du projet, il semble étonnant de constater que ces galeries ne soient prévues qu'en monotube, et non doublées ; en effet, en cas d'incendie ou d'éboulement, il s'avère toujours précieux (vital) de pouvoir utiliser une voie de secours, on peut prendre comme exemple les tunnels souterrains autoroutiers, le tunnel sous la Manche, et les évolutions de conception du projet Cigéo.

### Criticité

Il est étonnant également de constater que la descente des colis de type C (HA et combustibles usés) se fasse par un puits car il est compréhensible qu'en cas de chute de colis en puits, un réaménagement des assemblages pourrait aboutir à une situation de criticité. On peut d'ailleurs noter que cette conception d'acheminement des colis par puits a en effet été abandonnée dans Cigéo, pour cette même raison, au profit d'une descenderie.

### Co-activité

Il n'est pas précisé, et il est assez difficile de comprendre comment pourra se gérer la co-activité de construction et de stockage dans des zones non séparées physiquement. En effet, il faudra gérer la coexistence de la ventilation des poussières, des gaz d'échappement des engins de creusement et de convoyage des verses (1 à 2 millions de m<sup>3</sup> sont sans doute à prévoir), des zones de stockage des huiles de moteurs, des zones de chargement de batteries, de l'hydrogène et d'une teneur limitée, mais cependant présente de gaz radioactifs...

### Ventilation

Il est certain, et en particulier durant la phase de co-activité (cf. point précédent) qu'une forte ventilation soit nécessaire. Il est à rappeler que la ventilation prévue pour Cigéo se situe entre 500 à 650 m<sup>3</sup>/s dans le puits d'extraction d'air de 11 m de diamètre<sup>27</sup>. Il est également difficile de comprendre comment une ventilation appropriée peut se répartir sans spécialisation (aspiration versus extraction) entre les 3 puits envisagés, et sans conduits séparés en hauteur de galerie. Il ne semble pas qu'il soit mentionné la présence de clapets anti-retour d'air ou de gestion des fumées en cas d'incendie. Il reste également difficile de comprendre comment s'effectue le nécessaire renouvellement d'air (pour ne pas atteindre la Limite Inférieure d'Explosivité de 4% de l'H<sub>2</sub>) dans des galeries borgnes, et comment des filtres THE (Très Haute Efficacité) pourraient être efficaces et possibles dans un tel environnement, en cas d'accident nucléaire.

## LES INTERACTIONS ENTRE ÉLÉMENTS ET RISQUES ASSOCIÉS

### —LA TEMPÉRATURE ET L'AUGMENTATION DE LA PERMÉABILITÉ

En considérant un début de stockage des déchets C à l'issue d'une période de 60 ans, il apparaît que les puissances thermiques des super-containers pourront atteindre des valeurs bien supérieures à 1000 W (4 fois 500 W ou 1100 W) alors que l'on sait, de par l'expérimentation Praclay<sup>28</sup> que pour atteindre des températures de 80°C dans cette roche il suffit de 350 à 450 W/m de puissance thermique. Au-delà de cette limite, les transformations minéralogiques amènent assurément à des changements structurels de perméabilité. Dans cette même expérimentation, il a été noté également que ces impacts de températures augmentaient constamment sur la période de l'expérimentation (42 mois) pour affecter thermiquement des zones jusqu'à 15 m des sources de chaleur<sup>29</sup>.

### —LA VENTILATION (DÉSATURATION) ET LES RISQUES D'EFFONDREMENT

Il a été confirmé également depuis des travaux récents sur l'impact des transferts de gaz sur le comportement pro-mécanique des matériaux argileux en 2011<sup>30</sup> que non seulement la perméabilité aux gaz de l'argile dépend également beaucoup de son degré de saturation<sup>31</sup>, mais qu'en présence d'une forte ventilation, couplée à une grande quantité de chaleur, l'évaporation importante en paroi va même développer des phénomènes de fracturation et d'endommagement conséquents de la roche; on peut d'ailleurs faire le lien avec l'observation sur un sol argileux des crevasses générées par l'évaporation de l'eau. Cette évaporation va créer des chemins préférentiels d'écoulement<sup>32</sup>, et de migration potentielle des radioéléments, jusqu'à pouvoir créer de véritables fissurations et fractures dans le massif<sup>33</sup> (figure notée 5-14)<sup>34</sup> avec des déformations volumiques pouvant atteindre 8 à 11%, et par conséquent risquer une instabilité des installations.



### —LES DÉGAGEMENTS GAZEUX (HYDROGÈNE) ET LA FRACTURATION DE LA ROCHE

Concernant les déchets B matrice bitume, l'insertion de ces colis dans du béton dans lequel uniquement 20% d'espace libre est prévu pour faire face à un gonflement jusqu'à 70% (mentionné précédemment) entraînera très probablement à terme un éclatement de ces super-containers (car des pressions peuvent atteindre jusqu'à 43 MPa sous contraintes<sup>35</sup>) avec libération de ce bitume, et alors pouvant générer par voie de conséquence une déformation par pression sur la roche. Il est en effet à noter que le seuil de pression correspondant à un début de fracturation de l'argile de Moll commence à des pressions très faibles de 0,9 à 2,9 MPa<sup>36</sup>, favorisant bien entendu ensuite des chemins préférentiels de passage comme vu précédemment également.

### —LA CONCEPTION (PUITS ET GALERIES BORGNES) ET LES RISQUES D'EXPLOSIONS

Le premier risque d'explosion de type nucléaire reste lié à la descente des colis (pour les combustibles usés) par un puits; en effet, dans les dossiers de l'Andra, il est bien mentionné en 2005 avant le projet de descenderie: « Les événements susceptibles d'induire un risque de criticité correspondent à la conjonction d'un fort endommagement accidentel des colis de CU suite à leur chute et à une arrivée d'eau »<sup>37</sup>.

Le deuxième risque réside dans le fait que tout espace dans lequel il peut exister une certaine teneur en hydrogène doit être impérativement ventilé pour exclure une explosion. Il est à rappeler en effet qu'au-delà d'une teneur de 4%, une explosion peut survenir et qu'un m<sup>3</sup> d'hydrogène équivaut à la puissance explosive d'environ 2 kg de TNT. Il reste par conséquent assez difficile de comprendre comment des galeries aussi longues, de près d'un kilomètre pourront être ventilées, en étant bouchées d'un côté, sans une quelconque circulation d'air en période d'exploitation.

# SYNTHÈSE

## — LES ZONES DE CREUSEMENT (FRACTURATION) ET LA MIGRATION DES RADIOÉLÉMENTS

Lors du creusement dans une roche plastique comme l'argile, il se crée par ces contraintes mécaniques une zone perturbée appelée EDZ (Excavation Damaged Zone) qui s'étend selon les modes de creusement jusqu'à environ 2,1 fois le rayon de la cavité<sup>38</sup>; cette zone est particulièrement délicate car si on considère un diamètre de 6 m utile pour les galeries, soit un creusement d'au moins 8 m minimum pour insérer les soutènements, cela entraîne des perméabilités augmentées jusqu'à 4 à 5 ordres de grandeur<sup>39</sup> dans un espace d'environ 16 m, soit au final une épaisseur vierge résultante de seulement une quarantaine de mètres des aquifères.

## — PÉRIODE D'EXPLOITATION ET RISQUES D'INCENDIE

Comme mentionné précédemment, l'argile reste une roche très sensible à une augmentation de température, et par conséquent, il reste qu'un incendie en milieu souterrain avec l'effet « four » associé contenant la dissipation de chaleur, induit très rapidement une augmentation de la température. Il suffit de penser à l'inflammation d'un convoyeur lié à un défaut de maintenance (huile, diesel ou batterie) comme cela a été le cas dans le site de stockage américain WIPP (Waste Isolation Pilot Plant), ou encore à une réaction chimique entre composés (cf. explosion dans ce même site du WIPP ou l'incendie de Stocamine) pour comprendre que la faible épaisseur de la couche ne permettrait aucune dérive ni éboulement associé à ce type d'incident.

## STRUCTURE DU PROJET

Il apparaît très nettement que des risques très importants et multiples restent inhérents à la structure même du projet, essentiellement par :

- Le choix d'une matrice argileuse pour l'enfouissement, une roche saturée en eau et non auto-porteuse.
- La profondeur du projet, trop proche de la surface, à quelques dizaines de mètres de sources d'eau potable importantes et déjà exploitées.
- L'épaisseur de la couche, trop faible et de surcroît avec un pendage (quelques %, soit une dérive de 40 m pour 2 % sur 2 km); une telle installation industrielle peut nécessiter, à priori, une disposition strictement horizontale pour des questions de circulation et d'embranchements. On pourra également noter beaucoup de risques d'exploitation associés à la co-activité et les importantes nuisances liées à la très importante ventilation à proximité de zones habitées.

On ne peut pas également ne pas mentionner la question du temps long pour ce type d'installation; en effet, quel sera l'état des structures après une centaine d'années en termes d'étanchéité des puits, comment pourra s'effectuer la maintenance de galeries qui auraient pu s'effondrer, enfin quelles seront les évolutions des déchets? Il suffit de revenir sur la formation de gels sur certains fûts en 2014 et sur les questionnements de stabilité impérative au cours du temps de ces fûts<sup>40</sup>.

## COÛT DU PROJET

En raison des incertitudes d'inventaires (liées au retraitement ou non), en raison des déchets pas encore conditionnés (à Olen), mais surtout en raison de ces questions de conception et de structure de l'installation, on ne peut que constater la fluctuation du coût du projet qui s'établissait encore en 2011 à 3 milliards d'euros (coût total y compris marges pour aléas!)<sup>41</sup> et qui se monte aujourd'hui à 8, voire 10 milliards d'euros<sup>42</sup>.

# ENSEIGNEMENTS

---

Face à ces risques bien identifiés et aux incertitudes inhérentes à la complexité des phénomènes, et en raison de leur déroulement sur des temps longs, il semble inapproprié de devoir choisir immédiatement et de manière imposée entre une solution de moyen terme (entreposage longue durée) et de long terme définitive (enfouissement).

En effet, si l'on considère, à juste titre, de ne pas laisser aux générations suivantes ce fardeau, et si l'on se réfère aux largages par-dessus bord des déchets dans la mer faute de connaissances suffisantes par la génération qui nous a précédé, ne serait-il pas mieux de choisir en réalité les deux solutions, à savoir :

- 1.** **Mettre en sécurité ces déchets dans des entreposages de longue durée pour à minima une centaine d'années afin de permettre des décroissances de la puissance thermique des colis et une part de dégazages, mais également,**
- 2.** **Pouvoir donner aux générations futures les deux capitalisations qui leur permettront de régler en toute connaissance de cause la question de ces déchets.**
- 3.** **Provisionner suffisamment de fonds durant cette durée (après un chiffre plus assuré).**
- 4.** **Acquérir par des tests de longue durée et représentatifs du comportement d'un stockage souterrain selon différentes matrices, toutes les données nécessaires pour pouvoir décider sereinement du nécessaire choix d'une solution définitive de long terme.**

- 
- 1 ONDRAF/NIRAS Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan 2012 (NIROND TR 2013-12E), page 59
  - 2 NIROND TR 2013-12E, page 60
  - 3 NIROND TR 2013-12E, page 66
  - 4 Chambre des représentants, Résolution 541/9-91/92 relative à l'utilisation de combustibles contenant du plutonium et de l'uranium dans les centrales nucléaires belges, ainsi qu'à l'opportunité du retraitement des barres de combustible, adoptée le 22 décembre 1993
  - 5 Conseil des ministres, Compte rendu de la séance du 4 décembre 1998, 4 décembre 1998
  - 6 ONDRAF Plan déchets, septembre 2011 (NIROND 2011-02 F), page 24
  - 7 NIROND-TR 2013-12 E, page 350
  - 8 NIROND-TR 2013-12 E, page 190
  - 9 Thèse de M. Mouazen, 2011 – Evolution des propriétés rhéologiques des enrobés bitume, page 179
  - 10 ANDRA – Dossier Argile 2009, concepts d'entreposage, page 282
  - 11 ANDRA – Dossier Argile 2005, Architecture du stockage, page 456
  - 12 NIROND-TR 2013-12 E, page 350
  - 13 ANDRA – Dossier Argile 2005, Evaluation faisabilité, page 47
  - 14 ANDRA – Dossier Argile 2005, Architecture du stockage, page 146
  - 15 ANDRA – Dossier Argile 2005, Architecture du stockage, page 144
  - 16 NIROND 2011-02 F, page 140
  - 17 NIROND 2011-02 F, page 140 - NIROND TR 2013-12 E, page 135
  - 18 NIROND TR 2013-12 E, page 89
  - 19 NIROND TR 2013-12 E, page 253
  - 20 NIROND TR 2013-12 E, pages 69 et 76
  - 21 NIROND TR 2013-12 E, page 69
  - 22 NIROND TR 2013-12 E, page 71
  - 23 Id.
  - 24 NIROND TR 2013-12 E, page 74
  - 25 NIROND TR 2013-12 E, page 212
  - 26 NIROND TR 2013-12 E, page 221
  - 27 ANDRA – Dossier Argile 2005, Architecture, page 281
  - 28 The Praclay heater test, EURIDICE Report, 2017, page 24
  - 29 The Praclay heater test, EURIDICE Report, 2017, page 33
  - 30 Thèse de Pierre Gérard, Impact des transferts de gaz sur le comportement poro-mécanique des matériaux argileux, mai 2011 (TPG)
  - 31 TPG, page 26
  - 32 TPG, page 56

- 
- 33 TPG, page 137
  - 34 TPG, page 141
  - 35 NIROND TR 2013-12 E, page 169
  - 36 TPG, page 58
  - 37 ANDRA – Dossier Argile 2005, Evaluation de la faisabilité, page 30
  - 38 TPG, page 170
  - 39 ANDRA – Dossier Argile 2005, Evolutions phénoménologique du stockage, page 352
  - 40 Ondraf – Communiqué de presse du 26/09/2014
  - 41 NIROND TR 2013-12 E, page 133
  - 42 Les échos.be – des milliards supplémentaires pour stocker les déchets nucléaires – 22 août 2018



3

**FRANCE**

# STOCKAGE DES DÉCHETS NUCLÉAIRES DE HAUTE ACTIVITÉ EN FRANCE *Bernard Laponche*

---

## **COMBUSTIBLES IRRADIÉS ET DÉCHETS RADIOACTIFS 51**

- Le traitement des combustibles irradiés
- Les déchets radioactifs en France
- La gestion des déchets
- Caractérisation des déchets radioactifs
- Répartition en volume des déchets radioactifs par secteur économique en 2013
- Répartition des déchets radioactifs en contenu radiologique en 2013

## **LE PROJET CIGÉO DE STOCKAGE EN COUCHE GÉOLOGIQUE PROFONDE 54**

- Le stockage en couche géologique profonde
- Les déchets radioactifs prévus pour le stockage
- Le projet Cigéo
- Implantation de Cigéo
- La structure de Cigéo
- Le coût de Cigéo

## **LES RISQUES DU PROJET CIGÉO 56**

- Les risques liés à des explosions
- Les risques d'incendie
- L'éventualité de la perte de l'exploitation
- Le risque d'écoulement de l'eau dans la roche
- La sécurité face aux agressions externes

## **LA QUESTION DE LA RÉVERSIBILITÉ DU STOCKAGE 58**

## **LE STOCKAGE DE DÉCHETS RADIOACTIFS EN PROFONDEUR DANS LA CROÛTE TERRESTRE EST-IL ACCEPTABLE ? 59**

## **QUELLES SOLUTIONS PRÉCONISER 60**

## **CONCLUSION 61**

# COMBUSTIBLES IRRADIÉS ET DÉCHETS RADIOACTIFS

## LE TRAITEMENT DES COMBUSTIBLES IRRADIÉS

À la fin de leur utilisation dans le réacteur nucléaire (après trois ou quatre ans environ), les combustibles irradiés sont stockés sous eau dans des « piscines » situées à proximité des réacteurs. Ils sont constamment refroidis par circulation d'eau afin d'évacuer la chaleur produite par la radioactivité des produits de fission et des transuraniens (dont le principal est le plutonium) qu'ils contiennent.

La solution adoptée dans la majorité des pays équipés de centrales nucléaires (Etats-Unis, Allemagne, Suède, Japon, Corée du Sud...) est de garder les combustibles irradiés en l'état, de les laisser dans les piscines de stockage, et, après quelques années éventuellement, dans des installations de stockage à sec lorsque leur radioactivité et la chaleur qu'ils dégagent ont suffisamment diminué. Par contre, en France (La Hague) et au Royaume-Uni (Sellafield), le plutonium est extrait des combustibles irradiés dans une usine dite de « retraitement ». Les combustibles irradiés sont alors transportés des piscines des réacteurs aux piscines de La Hague afin d'en extraire le plutonium<sup>1</sup>.

Le retraitement consiste à extraire du combustible irradié, par voie chimique, l'uranium et le plutonium. Les produits de fission et transuraniens autres que le plutonium, ou « actinides mineurs » étant gardés ensemble en l'état sous forme liquide<sup>2</sup>. Cette technique a été historiquement développée durant la seconde guerre mondiale pour la production de plutonium à des fins militaires, puis la production de plutonium a été poursuivie et amplifiée pour fournir du combustible à la filière des « surgénérateurs » : Phénix et Superphénix en France, aujourd'hui définitivement arrêtés.



Figure 1 – Grand bassin d'entreposage des combustibles irradiés à La Hague

Pour remplacer cette utilisation, un nouveau combustible a été imaginé pour se substituer au combustible classique à uranium enrichi dans les réacteurs à eau. Appelé MOX<sup>3</sup> (oxyde mixte d'uranium et de plutonium), il contient de l'uranium appauvri en uranium 235 et 7 à 9% de plutonium. Les combustibles irradiés MOX ne sont pas retraités. De ce fait, le retraitement en France ne réduit finalement que d'environ 15% la quantité de plutonium produite dans les réacteurs actuellement en activité, dont une partie reste « en stock » à La Hague<sup>4</sup>. Les produits de fission et les actinides mineurs sont conservés sous forme liquide dans des cuves qui doivent être en permanence refroidies et leur contenu agité pour éviter des concentrations de matière. La dernière étape consiste à fabriquer des blocs de verre à partir des solutions de produits de fission et actinides mineurs qui sont stockés à sec à l'usine de La Hague, dans des silos qui doivent être refroidis en permanence (du fait de l'énergie dégagée par la radioactivité de ces verres) et ne seraient déplaçables qu'après plusieurs dizaines d'années (au moins 60 ans).



Figure 2 - Conteneur métallique de déchet HA vitrifié

On voit que ce système aboutit à une accumulation de déchets de natures très différentes. Il apparaît clairement que le retraitement n'a pas en réalité pour objectif une gestion optimale des déchets mais bien la production du plutonium (les usines de La Hague se nomment d'ailleurs UP2 et UP3 et UP signifie « Usine Plutonium »).

---

## LES DÉCHETS RADIOACTIFS EN FRANCE

### — LA GESTION DES DÉCHETS

L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) est un établissement public, placé sous la tutelle des ministères chargés de l'Énergie, de l'Environnement et de la Recherche, dont les missions concernent la gestion des déchets produits par les diverses activités nucléaires sur le territoire français.

Créée en 1979 au sein du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), depuis la loi de 1991, l'ANDRA est indépendante. Elle remplit plusieurs missions. D'une part, elle inventorie et collecte les déchets radioactifs générés par les centrales nucléaires, pour la production d'électricité, mais aussi par les institutions de recherche, le secteur militaire et les hôpitaux. Elle est aussi chargée de trouver des solutions de gestion et de stockage des déchets dits ultimes, c'est-à-dire qui ne peuvent pas être traités avec les technologies existantes.

L'ANDRA exploite trois sites de stockage (Soulaines, Morvilliers, la Manche), ainsi qu'un laboratoire de recherche souterrain situé sur les communes de Bure (Meuse) et Saudron (Haute-Marne).

### — CARACTÉRISATION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Les différents types de déchets sont regroupés en grandes catégories, principalement selon leur durée de vie et leur niveau de radioactivité. La classification en vigueur en France, basée sur ces critères, retient :

- Deux seuils de durée de vie, de 100 jours et de 31 ans (vie très courte: moins de 100 jours; vie courte: entre 100 jours et 31 ans; vie longue: plus de 31 ans);
- Quatre niveaux de radioactivité: très faible activité (tfa: moins de 102 Bq/g); faible activité (fa: entre 102 et 105 Bq/g); moyenne activité (ma: entre 105 et 108 Bq/g); haute activité (ha: plus de 108 Bq/g).

L'association de ces deux critères permet de définir les catégories de déchets:

- TFA: très faible activité, dont: TFA-VC: très faible activité, vie courte; TFA-VL: très faible activité, vie longue.
- FMA-VC: faible et moyenne activité, vie courte
- FA-VL: faible activité, vie longue
- MA-VL: moyenne activité, vie longue
- ha: haute activité.

## — RÉPARTITION EN VOLUME DES DÉCHETS RADIOACTIFS PAR SECTEUR ÉCONOMIQUE EN 2013<sup>5</sup>

**Tableau 1 – Répartition du volume total et du contenu radiologique des déchets par secteur économique et par filière de gestion en 2013**

\* Les déchets identifiés dans la catégorie DSF (déchets sans filière) sont ceux qui n'entrent pour le moment dans aucune des filières existantes ou à l'étude, en raison notamment de leurs caractéristiques chimiques et physiques. Les études concernant ces déchets sont en cours.

m <sup>3</sup>	Electronucléaire	Recherche	Défense	Industries	Médical	TOTAL	%	Elec./Total
HA	2,700	190	230			3,120	0.22	0.865
MA-VL	26,000	10,000	6,200	170		42,370	2.93	0.614
FA-VL	42,000	20,000	17,000	12,000	2	91,002	6.3	0.462
FMA-VC	580,000	200,000	61,000	22,000	8,500	871,500	60.32	0.666
TFA	220,000	160,000	42,000	11,000	3	433,003	29.97	0.508
DSF	2,400	740	650	4	1	3,795	0.26	0.632
TOTAL	873,100	390,930	127,080	45,174	8,506	1,444,790	100	0.604
Part en %	60.4	27.1	8.8	3.1	0.6	100		

Ces volumes correspondent aux déchets une fois conditionnés en colis dits « primaires », de manière à pouvoir être entreposés et transportés vers les centres de stockage. Dans certains cas particuliers, comme le stockage à sec en sub-surface ou le stockage profond par exemple, un conditionnement complémentaire serait nécessaire avant que les déchets puissent être stockés. On voit que les déchets HA proviennent presque exclusivement du secteur électro-nucléaire, c'est-à-dire des combustibles irradiés. Le parc électronucléaire français actuellement en fonctionnement est de 58 réacteurs à uranium enrichi et eau sous pression de puissance électrique allant de 900 à 1450 MW, répartis en 19 centrales nucléaires.

## — RÉPARTITION DES DÉCHETS RADIOACTIFS EN CONTENU RADIOLOGIQUE EN 2013

Le becquerel (symbole: Bq) est l'unité de mesure de l'activité d'une certaine quantité de matière radioactive: c'est le nombre de désintégrations qui s'y produisent par seconde. On utilise couramment le Tera-becquerel (TBq), soit 10<sup>12</sup> Bq ou mille milliards de Bq.

### La radioactivité se manifeste par l'émission de rayonnements :

- Ceux qui se traduisent par émission de particules: particule « alpha » ou noyau d'hélium, particule « bêta » ou électron, et neutrons.
- Ceux qui correspondent à l'émission de photons: rayonnements « gamma » ou « X ».

Les déchets HA, essentiellement produits par l'industrie électronucléaire, représentent 98 % de la radioactivité totale des déchets.

**Tableau 2 – Activités totales et par type de rayonnement, calculées au 31 décembre 2013**

Unité: TBq	Alpha	Beta et Gamma vie courte	Beta and Gamma vie longue	Radioactivité Total
HA	3,500,000	210,000,000	350,000	220,000,000
MA-VL	44,000	4,300,000	1,100,000	5,500,000
FMA-VL	720	16,000	2,800	19,000
FMA-VC	910	27,000	8,300	36,000
TFA	3	4	1	8

Source: ANDRA

# LE PROJET CIGÉO DE STOCKAGE EN COUCHE GÉOLOGIQUE PROFONDE

## LE STOCKAGE EN COUCHE GÉOLOGIQUE PROFONDE

Le stockage en couche géologique profonde, couramment appelé enfouissement, est envisagé pour gérer des déchets nucléaires, en complément du stockage de surface dans plusieurs pays, en particulier pour les déchets de haute et moyenne activité à vie longue. Il consiste à conditionner ces déchets puis à les placer dans une formation géologique stable en interposant des barrières naturelles et artificielles entre les déchets et l'environnement. Ce mode de gestion repose sur l'hypothèse que la rétention des déchets peut atteindre une durée suffisante pour assurer leur décroissance radioactive (jusqu'à un million d'années).

Différentes formations-hôtes sont actuellement étudiées ou utilisées dans le monde: tuf volcanique, granite, sel, argile, etc. Le comportement de ces différents matériaux vis-à-vis des contraintes du stockage (température et présence d'eau particulièrement) détermine la nature des barrières mises en place.

Ayant d'abord décidé par la loi d'explorer la faisabilité d'un stockage profond en site granite ou en site argile, les autorités françaises ont abandonné l'option granite du fait du refus des populations et la recherche s'est concentrée sur l'argile, avec la construction sur le site de Bure, zone peu peuplée et relativement pauvre aux confins de l'Ardenne et de la Champagne, d'un laboratoire de recherche de l'ANDRA, agence nationale chargée de la gestion des centres de stockage des déchets, qui a fonctionné à partir de 2011.

Ces travaux ont abouti à la présentation du projet Cigéo (Centre industriel de stockage géologique) qui a été soumis à deux débats publics: le premier sur le problème général de la gestion des déchets radioactifs (2005), le second sur le projet Cigéo lui-même (2013). Ces débats ont mis en évidence de nombreux problèmes de sûreté pendant la durée de la phase d'exploitation (chargement du stockage) qui devrait durer une centaine d'années, ont permis de questionner la pertinence de ce type de stockage et ont demandé l'exploration de solutions alternatives.

## LES DÉCHETS RADIOACTIFS PRÉVUS POUR LE STOCKAGE

Le scénario pris en référence pour le dimensionnement de Cigéo est une poursuite de la production électronucléaire avec une hypothèse de durée de fonctionnement des réacteurs existants de 50 ans. Les déchets produits par un éventuel futur parc de réacteurs ne sont pas pris en compte. Deux types de déchets sont envisagés pour le stockage dans Cigéo:

- Les déchets de « Haute activité à vie longue, HA-VL »: environ 10 000 m<sup>3</sup> en volume non conditionnés et de l'ordre de 30 000 m<sup>3</sup> en colis conditionnés pour l'enfouissement, soit pour 60 000 colis.
- Les déchets de « Moyenne activité à vie longue, MA-VL »: environ 70 000 m<sup>3</sup> en volume non conditionnés, soit de l'ordre de 350 000 m<sup>3</sup> en colis conditionnés, pour 180 000 colis, dont 75 000 d'enrobés bitumineux.

Il est important de noter que ces quantités de déchets à stocker ne prennent pas en compte des produits qui sont classés en « matières nucléaires » mais qui très probablement devront être un jour considérés comme déchets et, lorsqu'ils sont de haute activité ou de moyenne activité à vie longue, relèveraient d'un traitement semblable à ceux qui sont actuellement prévus pour Cigéo. Il s'agit en particulier des combustibles irradiés qui ne seraient pas retraités (dont les Mox irradiés). De même, rien n'est prévu pour le plutonium actuellement conservé à La Hague.

## LE PROJET CIGÉO

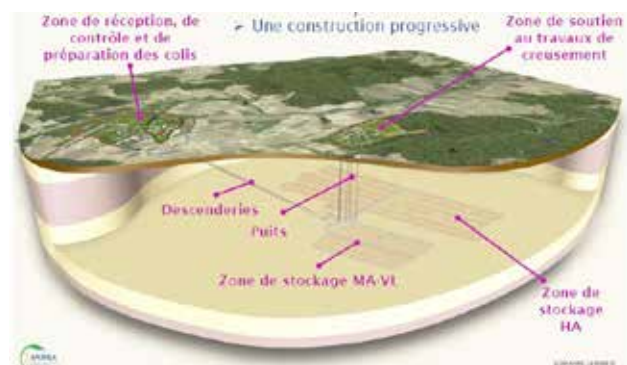


Figure 3 – Le projet de stockage Cigéo

---

## — IMPLANTATION DE CIGÉO

Le stockage des déchets radioactifs s'effectuerait dans une couche argileuse du Callovo-Oxfordien de l'ordre de 130 m d'épaisseur, à environ 500 m de profondeur, sur la commune de Bure dans le département de la Meuse. La construction du site de stockage implique le creusement de quatre puits d'accès et environ 265 km d'ouvrages souterrains pour la descendierie, les alvéoles et les galeries, et sur une surface souterraine de l'ordre d'une quinzaine de kilomètres carrés. Cette structure nécessitera par conséquent l'extraction de 7 à 8 millions de m<sup>3</sup> de roche avec l'introduction de plusieurs centaines de milliers de tonnes d'acier et la fabrication de 275 000 m<sup>3</sup> de béton pour constituer les structures de soutènement de l'ensemble.

## — LA STRUCTURE DE CIGÉO

Cigéo serait composé d'une installation souterraine dans laquelle seraient stockés les colis de déchets radioactifs. Pendant toute la durée d'exploitation (construction et chargement des déchets), deux sites distincts seraient opérationnels en surface pour réceptionner, contrôler et préparer les colis de déchets avant leur transfert dans l'installation souterraine (installations de la zone descendieries) et assurer la logistique des travaux souterrains (installations de la zone puits). L'installation souterraine se développera au fur et à mesure de l'exploitation. Au terme de la centaine d'années d'exploitation, cette installation représenterait une surface d'environ 15 km<sup>2</sup>.

Deux types d'alvéoles sont à différencier en fonction des déchets à stocker :

- **Des alvéoles dites 'HAVL'** (environ 1500) horizontales reliées par des galeries d'accès, d'une longueur d'environ 100 m, ce sont des tubulures en acier constituées de tronçons non soudés emboîtés, d'environ 70 cm de diamètre ; ces structures tubulaires permettront le passage et le stockage par poussage des colis HAVL jusqu'au fond de ces alvéoles.
- **Des alvéoles dites 'MAVL'** (environ 50) de 9 m de diamètre (section excavée d'environ 65 m<sup>2</sup>) d'une longueur de 375 à 525 m ventilées avec des retours d'air vers les galeries de liaison ; ces sortes de tunnels, équipés d'équipement de manutention sur rails, permettront le stockage de différentes formes parallélépipédiques d'emballages en béton des colis de déchets.

Il a été décidé que ces alvéoles seraient irradiantes, c'est-à-dire que les colis ne seraient pas dotés de protections radiologiques pour des raisons d'optimisation des volumes souterrains.

## — LE COÛT DE CIGÉO

Les déchets radioactifs ultimes engendrés par la filière électronucléaire ont plusieurs origines : l'exploitation des installations nucléaires, leur démantèlement, la reprise et le conditionnement des déchets anciens et les combustibles usés, retraités ou non.

Il est très difficile de chiffrer précisément le coût de gestion total des déchets qui augmente au fil du temps. D'après la Cour des comptes, fin 2013, le total des charges brutes pour la gestion des déchets à long terme s'élevait à 32 Mds €, dont 26 Mds à financer par EDF (81%). C'est sans compter les charges de gestion des combustibles usés : estimées à 16 Mds d'euros par EDF au 31 décembre 2013. Enfin, en ce qui concerne le coût du projet Cigéo d'enfouissement en couche géologique profonde des déchets HAVL et MA-VL : en 2015, l'ANDRA l'estimait à 35 Mds d'euros. Mais en 2016, le gouvernement fixait, par décret, le coût de Cigéo à 25 Mds d'euros.

# LES RISQUES DU PROJET CIGÉO

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a émis un avis relatif au dossier d'options de sûreté (DOS) présenté par l'ANDRA pour le projet Cigéo<sup>6</sup>. Cet avis s'appuie sur les travaux de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)<sup>7</sup> et sur le rapport de la revue internationale par des pairs régulateurs de différentes nationalités, sollicitée par l'ASN et organisée par l'AIEA, sur le « Dossier d'options de sûreté » présenté par l'ANDRA (ERI: Equipe de revue internationale)<sup>8</sup>. Les points de vue critiques exprimés dans ces différents rapports confirment les analyses des experts indépendants et en particulier celles de Bertrand Thuillier<sup>9</sup> à qui nous empruntons les éléments d'analyse présentés ci-dessous. Il apparaît en particulier que les risques pour les travailleurs pendant la durée de construction et d'exploitation du site seraient considérables du fait de la conjonction des risques de grand chantier, des risques d'opérations en milieu souterrain et du risque lié à la radioactivité des colis de déchets à enfouir.

## LES RISQUES LIÉS À DES EXPLOSIONS

Les risques d'explosion sont très liés à la génération continue d'hydrogène car, en cas de dépassement de plus de 4% d'hydrogène, dans tout espace qui ne serait pas correctement ventilé (alvéole, galerie, hotte, colis), la moindre étincelle, issue par exemple d'une batterie défaillante et non étanche, d'un éclairage cassé, d'huile sur un moteur trop chaud, voire des systèmes de contrôle et de surveillance eux-mêmes ou encore de friction, peut produire une explosion. Les dossiers de conception de l'ANDRA témoignent de l'importance de ces risques, en particulier pour les alvéoles MAVL avec la radiolyse des matières organiques de certains colis. Tout repose par conséquent sur la ventilation, l'interruption de celle-ci ne devant pas dépasser la dizaine de jours.

Mais comment penser qu'il ne puisse pas se produire une seule interruption de quelques semaines de cette ventilation dans tout espace du stockage en lien avec un éboulement, une arrivée d'eau ou encore le moindre défaut d'alimentation électrique ?

Comment dans un tel projet, avec tous ces véhicules, ces engins de manutention, les éclairages, et tous ces systèmes de radioguidage, éviter la moindre étincelle fatale avec de l'hydrogène omniprésent, une accumulation dans des parties non ventilées s'avérant toujours possible ?

Et les colis seraient alors bien endommagés, en effet l'ANDRA ne nie pas qu'« une explosion pourrait entraîner la perte d'une fonction de confinement »<sup>10</sup>. La perte d'une fonction de confinement voulant bien entendu dire un relâchement potentiel de radionucléides dans les installations. On peut lire également: « Les conséquences potentielles d'une explosion sont des blessures du personnel, l'endommagement ou la destruction de matériels et d'équipements (notamment l'endommagement d'une barrière de confinement ou d'une barrière de protections radiologiques conduisant à un risque de dissémination et/ou d'exposition externe) »<sup>11</sup>.

Et alors, les recommandations de l'IRSN se font plus précises, en mentionnant qu'il « appartiendra à l'ANDRA d'évaluer les conséquences d'une explosion et, le cas échéant, de présenter les dispositions de surveillance, de prévention, de limitation des conséquences et/ou d'intervention retenues ».

## LES RISQUES D'INCENDIE

Les risques d'incendie sont sans doute les risques les plus graves par la présence concomitante dans une alvéole MAVL de l'hydrogène, de colis inflammables (de l'ordre de 10 000 tonnes de bitume pur au total, soit de l'ordre de 100 à 500 tonnes par alvéole), et cette forte ventilation obligatoire (plusieurs centaines de m<sup>3</sup>/s au total dans le stockage) pour justement évacuer l'hydrogène et les gaz radioactifs.

La maîtrise d'un incendie dans un tel environnement souterrain serait particulièrement délicate à gérer :

- En premier lieu par le temps nécessaire à sa détection (265 km d'ouvrages souterrains),
- Par les difficultés d'accès des pompiers (alvéoles irradiées et équipement nécessaire de protection aux risques radiologiques très lourd et très difficile à supporter),
- La gestion difficile de l'importante ventilation (arrêt nécessaire, progressif, mais colmatage de filtres, présence de clapets anti-retour, mais aussi extraction nécessaire des fumées), et
- L'utilisation restreinte de l'eau en raison du milieu souterrain et argileux, et pour ne pas augmenter la criticité potentielle de certains colis (effet miroir pour les neutrons).

Cette vulnérabilité du stockage en cas d'incendie avec des risques d'embrasement complet d'une alvéole est bien réelle comme le démontre l'IRSN avec ses études de simulation de la propagation d'une onde thermique d'un colis source d'un foyer à un colis cible en quelques heures seulement.



Il est alors difficile de croire que l'on pourrait en quelques heures, dans cette centaine de kilomètres de galeries et/ou d'alvéoles, détecter un foyer débutant, contenir le feu, évacuer le personnel, faire venir les secours, arrêter la ventilation, et maîtriser le feu... avant que les structures ne se dégradent.

En effet, ici encore, l'IRSN estime que « les dispositions de détection et d'extinction ne sont pas suffisantes dans la partie utile de l'alvéole MAVL dans la mesure où elles ne permettent pas de garantir la maîtrise d'un incendie dans le délai de l'ordre de l'heure, en cas de défaillance des systèmes ».

### **L'ÉVENTUALITÉ DE LA PERTE DE L'EXPLOITATION**

Il serait impossible de reprendre une exploitation 'normale' de l'installation après un tel accident. Cigéo, par conception, ne peut pas fonctionner avec des alvéoles ou des galeries contaminées en raison de la nécessaire ventilation ; en effet, ces contaminations seraient directement évacuées dans l'environnement. Ceci est encore souligné par l'IRSN qui « regrette qu'aucune disposition particulière ne soit étudiée par l'ANDRA au stade du DOS (Dossier des Options de Sûreté) pour favoriser la reprise d'exploitation après un accident. », et que l'ANDRA « ne présente pas de moyen qui lui permettrait d'intervenir sur un désordre constaté. ». On comprend, par voie de conséquence, que le principe de réversibilité ne pourrait pas s'appliquer dans ces conditions, avec de fait, une impossibilité de continuer l'exploitation, et par conséquent bien entendu de pouvoir récupérer des colis endommagés. Cette difficulté de réparation en lien avec la question de l'hydrogène n'est pas niée par les techniciens de l'ANDRA, et cela reste bien compréhensible : « les délais pour réaliser une intervention importante dans un milieu confiné difficile d'accès sont à estimer pour différents scénarios dégradés afin d'être en mesure de se prononcer sur leur compatibilité avec la maîtrise du risque d'explosion ».

### **LE RISQUE D'ÉCOULEMENT DE L'EAU DANS LA ROCHE**

La question de l'écoulement de l'eau dans la roche a attiré particulièrement l'attention de la revue par les pairs (ERI) de l'avis de l'ASN. Nous en extrayons les éléments suivants :

#### **Extrait de l'observation n° 12 :**

« Bien que l'Andra ait argumenté, d'après leur étude étendue du site, que la probabilité d'apparition de discontinuités participant à l'écoulement de l'eau (fractures par exemple) dans la ZIRA (Zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie) est négligeable, l'ERI suggère à l'Andra de prendre en compte la fracturation de la roche du Cox (abréviation de « Callovo-Oxfordien » (qualification précise de l'argilite de la couche géologique prévue pour l'enfouissement des déchets) dans le cadre des scénarios hypothétiques ». et,

« Le calcul de la portée des caractéristiques spatiales et hydrauliques de discontinuités favorisant l'écoulement permettrait à l'Andra d'illustrer : le niveau élevé de la roche du Cox contribuant de manière significative à la robustesse générale du système de stockage en phase après fermeture ; l'impact de ces discontinuités dans la roche du Cox de la ZIRA sur la sûreté, permettant ainsi d'évaluer la robustesse du concept ».

#### **Extrait de la recommandation n°4 :**

« L'Andra doit considérer des mécanismes d'écoulement des eaux au sein du Cox dans le cadre de calculs de simulation hypothétiques pour renforcer la démonstration de la robustesse du système de stockage, en particulier les performances de la roche du Cox en matière de sûreté ».

### **LA SÉCURITÉ FACE AUX AGRESSIONS EXTERNES**

Aux risques liés à la conception, la construction et l'exploitation du site s'ajoutent les questions de sécurité du site par rapport à des agressions externes. D'une part, des agressions externes liées à des phénomènes climatiques qui ne sont pas à rejeter sur la période de plus d'un siècle que durerait l'exploitation du site qui pourraient notamment interrompre la fourniture d'électricité et donc la ventilation des installations souterraines (violentes tempêtes, pluies torrentielles et inondation du site, chutes de neige bloquant toute circulation, etc.). D'autre part, des agressions extérieures malveillantes, alors que se dérouleraient en parallèle la construction de cet immense labyrinthe de galeries et d'alvéoles d'une emprise au sol d'au moins 15 km<sup>2</sup> équipé de bouches d'aération réparties sur tout ce territoire, et la réception et l'enfouissement de colis radioactifs. Cela représente le fonctionnement de deux installations nucléaires de base, l'une en surface et l'autre à 500 mètres de profondeur. La vulnérabilité d'un tel ensemble est évidente.

# LA QUESTION DE LA RÉVERSIBILITÉ DU STOCKAGE

La réversibilité du stockage a été une exigence du Parlement dans la loi du 28 juin 2006 dans son article 5 : « Le stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs est le stockage de ces substances dans une installation souterraine spécialement aménagée à cet effet, dans le respect du principe de réversibilité ». La signification de ce principe est explicitée dans la loi du 25 juillet 2016 :

**“ La réversibilité est la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l’exploitation des tranches successives d’un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion. ”**

En réalité, la réversibilité est limitée à la période d’exploitation (ce qui représente un petit nombre de générations futures) et on apprend en plus que la récupérabilité d’un ou des colis, qui est dans les faits l’application de la réversibilité, ne serait imposée que dans la phase industrielle pilote du début de l’exploitation du site.

En réalité, la situation d’irréversibilité a existé dès le choix de l’enfouissement en couche d’argile puisqu’il serait impossible de « revenir en arrière » ou de changer de stratégie de gestion des déchets une fois la fermeture de l’installation effectuée. Mais cette option d’irréversibilité en fin de chantier, qui est cohérente avec la notion de stockage « définitif », ne devrait en aucun cas concerner la longue phase de chantier de plus de 100 ans qui précéderait la fermeture et « l’oubli » du site. Tout au long de cette période, la réversibilité est essentielle pour pallier les aléas d’un chantier comprenant de nombreux risques et permettre de récupérer les déchets défectueux dans des délais compatibles avec la sûreté du site et des populations environnantes. Les promoteurs du projet eux-mêmes admettent (et cela a été souligné en particulier par la revue de l’ERI) que l’on ne peut exclure la présence d’un colis de déchet défaillant et la nécessité de le récupérer, ou bien la nécessité d’intervenir sur un accident, même banal, pendant la durée du chargement des déchets. En cas de difficulté dans le chantier, la réversibilité devrait être compatible avec le traitement de l’accident.

Ce n’est évidemment pas le cas si un incendie se déclençait au fond d’une galerie comportant une série de colis et qu’il faudrait des mois pour le sortir. Or aucun élément temporel sur le rythme de réversibilité en situation normale ou accidentelle n’est indiqué par l’ANDRA.

# LE STOCKAGE DE DÉCHETS RADIOACTIFS EN PROFONDEUR DANS LA CROÛTE TERRESTRE EST-IL ACCEPTABLE ?

La thèse selon laquelle on dispense ainsi les générations futures de se soucier des déchets radioactifs, parce que, d'une certaine façon, on va les faire « disparaître », est d'une grande hypocrisie : en les enfouissant de manière totalement irréversible dans la croûte terrestre sans aucun espoir de modification de stratégie, on impose en fait aux générations futures une pollution du sous-sol qu'elles ne pourront que découvrir et en pâtir très probablement, sans pratiquement aucun moyen d'agir.

Il est aventureux de prétendre « imaginer l'inimaginable » (au dire de l'ex-directrice de l'ANDRA) quand il s'agit de « garantir » un stockage sans encombre pendant plus de cent mille ans. Certes, les expériences réalisées sur les couches géologiques devraient permettre de calibrer des modèles complexes, mais nul ne peut s'engager sur des événements géologiques inattendus, et aujourd'hui probablement unimaginables.

Plus concrètement, le risque d'infiltration d'eau dans des couches géologiques est probablement le principal risque « technique » à long terme, sans doute inévitable : au bout de combien de temps des eaux chargées d'éléments radioactifs pourraient remonter à la surface ? Et cela quelle que soit la nature de la couche géologique concernée, l'argile étant toutefois plus favorable que le granite selon ce critère.

Le second inconvénient est la perte de mémoire de ce stockage souterrain. Certes, ce problème est étudié et les idées ne manquent pas. Selon les uns, l'objectif de l'enfouissement des déchets étant de les « faire disparaître », la meilleure solution serait de ne rien signaler aux générations futures et de confier à la géologie le soin de maintenir ces déchets bien calfeutrés et ignorés. Pour les autres, il faut au contraire faire le maximum pour signaler, sur longue période, la présence de ce lieu souterrain de risque majeur. Mais on parle de siècles et de millénaires ; que sera cette région à très long terme ? Et, quelles que soient les précautions prises, information ou non, suffisamment de bouleversements de toute nature peuvent survenir pour que la seule mémoire reste sans doute « qu'il y a quelque chose au fond qui pourrait bien être précieux » et qu'il faudrait aller le chercher.

Ce qui paraît à court et moyen terme le plus grave est que si la France, « championne du nucléaire », adoptait cette solution d'enfouissement en profondeur, il n'est pas difficile d'imaginer que de nombreux Etats et entreprises s'empresseraient de « faire comme la France ». Ce modèle idéal serait internationalement adopté pour faire disparaître non seulement des déchets radioactifs mais aussi toutes sortes de déchets toxiques, dans des conditions invérifiables dans la pratique. Et l'on se trouverait en moins d'un siècle avec une croûte terrestre parsemée de trous soigneusement rebouchés, contenant des déchets extrêmement dangereux.

Après la pollution de l'atmosphère et des océans, si difficile à endiguer et à réduire, l'homme s'attaque sérieusement au sous-sol. Sous-sol riche en matières premières, en ressources énergétiques et surtout lieu de circulation et de stockage de l'eau, indispensable à la vie sur la Terre.

De la même façon que des conventions internationales (convention climat, protocole de Montréal, convention OSPAR) tentent d'améliorer la situation de l'air et de l'eau, il n'est pas interdit de penser que les générations qui nous suivent seront moins destructrices que les nôtres et qu'une convention internationale verra bientôt le jour, interdisant le stockage en profondeur de tout déchet toxique ou radioactif, à l'image de la Convention de Londres de 1993 interdisant toute immersion de déchets radioactifs.

Enfin, une fois refermé, le stockage en profondeur serait un choix imposé aux générations futures, car irréversible dans la pratique. Le choix de faire ou ne pas faire un stockage profond est loin d'être seulement scientifique et technique : c'est un choix éthique, politique et citoyen.

# QUELLES SOLUTIONS PRÉCONISER

---

Trois pistes sont recommandées : la poursuite des recherches afin de réduire, en quantité et dans le temps, la nocivité des déchets radioactifs, la sécurisation des entreposages et stockages actuels, l'entreposage pérenne en sub-surface.

La séparation-transmutation, une des trois voies de recherche de la loi de 1991, ne permettra pas de « régler » la question des déchets. Pour transmuter, il faut « sur-irradier » les déchets avec des neutrons. Et l'énergie de ces neutrons dépend des éléments contenus dans les déchets. Il faudrait donc séparer complètement tous les déchets (techniquement à peu près impossible, financièrement très élevé), et en outre, cela ne « supprime » pas les déchets. Cela diminue simplement la durée de vie d'une partie des déchets (de 10 000 ans à quelques centaines d'années). La transmutation est encore étudiée par le CEA, mais cela ne concerne qu'une infime partie des déchets. Et le débat de 2006 a conclu que ce ne pouvait pas devenir une solution industrielle pour les dizaines de milliers de tonnes de déchets existants. Mais le fait que cette voie de recherche paraisse décevante n'est pas une justification pour ne pas poursuivre les efforts de réduction de la nocivité des déchets radioactifs. La poursuite de ce domaine de la recherche doit être une priorité.

Le stockage en surface (considéré comme « définitif ») existe déjà pour des déchets de faible activité (centres de stockage ANDRA de Soulaïnes, Morvilliers, la Manche). Ces stockages devront être « contrôlés » pendant au moins 300 ans, voire 800 pour celui de la Manche car il contient parfois du plutonium.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de solution satisfaisante pour la gestion des déchets. Celle qui paraît la moins mauvaise paraît être le « stockage à sec en sub-surface ». La logique du projet Cigéo d'oubli et de confiance dans la nature et la technique comme garantie de sûreté a fait l'objet de vives controverses au cours du débat national sur la gestion des déchets radioactifs de 2006. Est apparue à cette occasion la notion d'entreposage surveillé et pérennisé qui repose sur une attitude très différente, en refusant l'oubli proposé comme solution à la société actuelle et future. L'entreposage envisagé impose en effet non seulement une surveillance mais la possibilité technique réelle d'extraire les fûts de déchets à tout moment et d'en disposer autrement.

La notion d'évolution (évolution scientifique et technique, évolution des esprits et des sociétés) est donc au cœur de ce concept concurrent qui a recueilli une large approbation au cours du débat public engagé par la Commission nationale du débat public sur la gestion des déchets radioactifs en 2005-2006. On peut également penser que des progrès importants peuvent être effectués dans les techniques de mise en colis et de conteneurs, ce qui serait évidemment rendu impossible par l'enfouissement définitif.

L'entreposage à sec existe déjà en France pour plusieurs types de déchets, notamment les verres produits à La Hague qui contiennent les produits de fission et les actinides mineurs (éléments plus lourds que l'uranium, hors plutonium) qui sont issus des combustibles usés provenant des réacteurs et séparés par le retraitement : ils sont entreposés à La Hague dans des silos verticaux et, comme ils sont très chauds, ils sont refroidis par une ventilation naturelle forte et une ventilation forcée. Ce sont des déchets HA-VL (haute activité, vie longue). En Allemagne et surtout aux États-Unis, les combustibles usés (ou combustibles irradiés) sont considérés comme des déchets puisqu'ils ne sont pas retraités comme en France (qui est pratiquement le seul pays à le faire à grande échelle). Ces deux pays ont développé et développent des entreposages de longue durée, à sec, sur le site même des centrales nucléaires (ce qui évite les transports), pour les combustibles usés, après un séjour d'environ cinq ans dans les piscines de refroidissement situées à proximité des réacteurs nucléaires.

Quant à la « sub-surface », il s'agit de stocker les combustibles irradiés des centrales sans aucun retraitement dans des galeries creusées à faible profondeur, ou dans le flanc de montagnes granitiques. De la sorte, on facilite la surveillance, et on garantit la possibilité d'extraire ces combustibles dans le cas d'une solution technique. Cette méthode peut s'appliquer également aux conteneurs (bien conditionnés) des déchets MA-VL existants, ainsi que des verres HA existants entreposés à La Hague, après la période de refroidissement nécessaire.

# CONCLUSION

---

## 1.

L'ensemble des faiblesses, des lacunes et des obstacles mis en évidence par les trois avis officiels – celui mis en consultation par l'ASN, celui de l'IRSN et celui de la Revue par les pairs – conduit à une remise en cause profonde du projet Cigéo présenté par l'ANDRA. Constat renforcé par nombre de commentaires en réponse à la consultation lancée par l'ASN.

## 2.

Les difficultés considérables ainsi mises en évidence doivent conduire le Gouvernement et le Parlement à remettre en cause ce projet qui ne peut que conduire à une impasse, sans parler des coûts considérables d'une telle entreprise qui seraient évidemment, in fine, à la charge de nos concitoyens.

## 3.

Le choix de l'enfouissement des déchets radioactifs en couche géologique profonde n'est pas acceptable : il ne fait pas « disparaître » les déchets, mais il les cache et impose de façon irréversible aux générations future une pollution de la croûte terrestre de durée illimitée à l'échelle humaine. Il impose de plus la mise en place et la gestion d'un chantier à haut risque pour les populations pendant une période de plus d'un siècle. La reproduction d'une telle solution dans des conditions incontrôlées ne pourrait qu'aboutir à la pollution à grande échelle des eaux souterraines dans de nombreuses régions du globe.

## 4.

En application des lois sur la gestion des déchets radioactifs, recommandée par les consultations citoyennes, la solution de l'entreposage à sec en sub-surface doit être sérieusement étudiée et un ou des installations pilotes réalisées.

## 5.

La stratégie de gestion des déchets radioactifs, après une longue période de désintérêt sur la question, a été conduite sur la base de choix – retraitement des combustibles, production du plutonium, différenciation discutable entre « matières valorisable et déchets...- dictés par, justement, les producteurs de déchets, doit être entièrement revisitée.

- 
- 1 Les piscines de La Hague contiennent en volumes de combustibles irradiés, l'équivalent d'une centaine de cœurs d'un réacteur de 1000 MW de puissance électrique.
  - 2 Le combustible irradié, initialement à l'uranium enrichi, d'un réacteur classique à eau sous pression et uranium enrichi, contient environ 95% d'uranium, 1% de plutonium et 4% de l'ensemble produits de fission et actinides mineurs.
  - 3 MOX : acronyme anglais de « mixed oxyde », mélange d'oxyde d'uranium et d'oxyde de plutonium. Les surgénérateurs fonctionnent aussi avec un combustible au plutonium dont la teneur en Pu est beaucoup plus élevée (>20%) que celle des MOX.
  - 4 Il reste cependant des quantités importantes de plutonium entreposées à l'usine de retraitement de La Hague, de l'ordre de 56 tonnes fin 2013, dont 39,5 appartiennent à la France.
  - 5 Source : ANDRA, inventaire 2015.
  - 6 <https://www.asn.fr/Reglementer/Bulletin-officiel-de-l-ASN/Installations-nucleaires/Avis/Avis-n-2018-AV-0300-de-l-ASN-du-11-janvier-2018>
  - 7 [http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports\\_gp/Documents/Dechets/IRSN\\_Rapport-2017-0013\\_GPDOS-Cigeo\\_Tome-1.pdf](http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_gp/Documents/Dechets/IRSN_Rapport-2017-0013_GPDOS-Cigeo_Tome-1.pdf)
  - 8 <https://www.asn.fr/Informer/Actualites/CIGEO-revue-internationale-du-dossier-d-options-de-surete>
  - 9 <https://www.encyclopedie-energie.org/les-risques-dexploitation-du-centre-industriel-de-stockage-geologique-cigeo/>
  - 10 Andra : <https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-01/392.pdf> - page 143.
  - 11 Id.

**4**

**JAPON**

# LA SITUATION DES DÉCHETS RADIOACTIFS DE HAUTE ACTIVITÉ AU JAPON

**Hideyuki Ban**

Le Japon a adopté une politique de stockage définitif en formation géologique pour les déchets de haute activité (DHA). Cependant, à ce jour et depuis longtemps, le consensus public en faveur de cette politique est insuffisant car les citoyens doutent profondément de la sûreté du système. Le site de stockage n'a pas encore été choisi.

## DE L'IMMERSION EN GRANDE PROFONDEUR AU STOCKAGE GÉOLOGIQUE

Dans les années 1960, la politique du Japon en matière de déchets de haute activité était axée sur l'immersion en grande profondeur, à cause des tremblements de terre et du manque de terrains disponibles. Cette politique a été changée au profit du stockage géologique à la suite à l'adoption de la Convention sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets, c'est-à-dire la Convention de Londres de 1972. La stabilité géologique au Japon étant médiocre, les barrières techniques sont plus importantes que les barrières naturelles pour garantir la sûreté du stockage géologique au Japon.

## DÉCHETS RADIOACTIFS VITRIFIÉS DE HAUTE ACTIVITÉ ET DÉCHETS RADIOACTIFS À VIE LONGUE ET BASSE TEMPÉRATURE (DVLBT)

Le gouvernement stipule que tout le combustible nucléaire usé doit être retraité, le Japon ayant adopté une politique de cycle fermé du combustible nucléaire. C'est pourquoi le combustible nucléaire usé n'est pas classé parmi les déchets radioactifs de haute activité. Cette politique devra toutefois être modifiée à l'avenir car il est impossible de retraiter tout le combustible usé<sup>1</sup>.

## CENTRE DE RECHERCHE SUR LE STOCKAGE DES DÉCHETS NUCLÉAIRES — HORONOBE, HOKKAIDO, JAPON



souterrain de Horonobe, Hokkaido, Japon, novembre 2016, photo : Mihoko Inagaki

Dans la ville de Horonobe, sur l'île d'Hokkaido, au nord du Japon, le stockage souterrain de déchets hautement radioactifs résultant du retraitement du combustible usé généré par les centrales nucléaires est en cours d'étude. Horonobe, une petite ville qui compte un peu plus de 2 600 habitants, est le seul endroit au Japon où sont menées de telles recherches. Au début des années 1980, la ville a engagé des efforts pour faire venir des industries liées au nucléaire dans la région afin de mettre fin au déclin de la population et de revitaliser la ville<sup>2</sup>. La ville a réussi à faire implanter des installations de recherche et d'entreposage de déchets hautement radioactifs en 1984. Cependant, le projet a été gelé en raison de la vive opposition des municipalités situées autour de la ville et de la population d'Hokkaido. Issu d'un compromis, le projet de recherche souterraine a été lancé en avril 2001 à la condition qu'aucune matière nucléaire ne soit introduite et que seules des recherches soient menées. Dans les municipalités proches d'Horonobe, de nombreux groupes de citoyens ont été créés l'année où la question des déchets nucléaires est devenue un sujet de controverse important. En janvier 1985, le Réseau d'Hokkaido Nord contre la venue des installations de stockage de déchets nucléaires a été créé pour permettre à tous ces groupes de travailler en réseau. (Plusieurs organisations de ce type ont été créées sur l'île d'Hokkaido.)



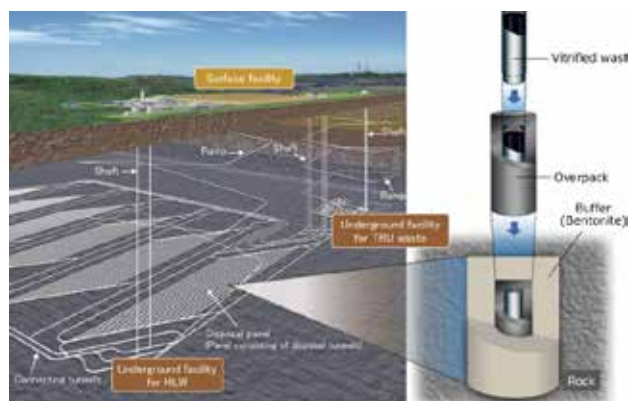
Pour sélectionner le site de stockage des déchets nucléaires et permettre ainsi un redémarrage rapide des réacteurs nucléaires, le gouvernement a fait passer le système de désignation du site de stockage d'un système d'auto-désignation volontaire par une municipalité à un système de désignation gouvernemental.

Le projet de recherche souterraine en grande profondeur de la ville d'Horonobe a été mené sur la base d'un accord qui prévoyait que la recherche serait interrompue après environ vingt ans. Cependant, l'Agence japonaise de l'énergie atomique (JAEA), l'Institution administrative indépendante qui supervise le projet, a tenté de prolonger cette période et a commencé à contester l'accord conclu avec les municipalités locales, qui prévoyait que le terrain creusé pour les installations souterraines serait remis en état après la fin des travaux de recherche. Il reste encore quelques personnes à Horonobe qui sont d'avis qu'il faudrait proposer d'accueillir les installations de stockage des déchets nucléaires. De plus en plus de gens craignent que la ville soit choisie pour accueillir les installations de stockage du fait d'une gestion déraisonnable du projet.

Il existe beaucoup de volcans actifs au Japon, les tremblements de terre sont fréquents et les eaux souterraines sont abondantes. Les scientifiques s'interrogent sérieusement sur la viabilité de la méthode de stockage en profondeur. Sur le plan géologique, la structure géologique d'Hokkaido est relativement nouvelle, puisqu'elle a été formée il y a à peine 100 000 ans. La région autour de la ville d'Horonobe est toujours soumise à des déformations et à une activité tectonique. Il existe dans la zone autour d'Horonobe des mudstones, qui contiennent un grand nombre de fissures et de grandes quantités d'eau souterraine. (L'eau comprend à la fois les eaux de surface et l'eau de mer fossile. Le volume moyen quotidien de l'eau évacuée des installations de recherche souterraines entre avril 2012 et mars 2013 était de 310,4 m<sup>3</sup>.) Il y a aussi des émissions gazeuses. Que cette recherche sur le stockage des déchets hautement radioactifs, qui doivent être isolés pendant 100 000 ans, soit menée dans un tel lieu, souligne un problème fondamental de la politique nucléaire du Japon.

## **SUPERFICIE ET CAPACITÉ DU SITE DE STOCKAGE DÉFINITIF ENVISAGÉ**

La Loi sur le stockage définitif des déchets de haute activité a été adoptée en 2000. La Loi stipule que les déchets doivent être enfouis sous terre à plus de 300 m de profondeur. La Société de gestion des déchets nucléaires (NUMO) du Japon a été créée par la loi pour trouver le site de stockage définitif et procéder à l'enfouissement des déchets de haute activité.



Référence schéma<sup>3</sup>

Le site de stockage prévu aura une superficie de 1 à 2 km<sup>2</sup> en surface et de 6 à 10 km<sup>2</sup> en profondeur. Environ 40 000 conteneurs, qui contiennent les déchets radioactifs de haute activité produits par le futur retraitement de Rokkasho, seront enfouis sur ce site. Les déchets radioactifs à vie longue et basse température, qui correspondent aux déchets transuraniens et à l'iode 129 produits par le retraitement, seront également enfouis dans le même site. Si le Japon continue de produire de l'énergie nucléaire pendant une plus longue période, par exemple au cours des 30 à 50 prochaines années, un autre site de stockage sera nécessaire. Mais après la catastrophe de Fukushima, cela semble irréaliste.

Chaque conteneur de déchets vitrifiés de haute activité devra être placé dans un conteneur en acier carbone de 19 cm d'épaisseur, appelé « suremballage », et entouré de 70 cm d'épaisseur de bentonite. Les déchets à vie longue et basse température devront être enfouis dans des boîtes carrées en acier carbone de 5 cm d'épaisseur. Selon la NUMO, la longueur des galeries sera de 200 à 300 km avec la galerie d'accès, la galerie principale et la galerie de stockage. Ces galeries seront obturées par de la roche avec de la bentonite. La NUMO envisage de maintenir le facteur de perméabilité à l'eau dans ces galeries à son niveau actuel. C'est cependant impossible et ces galeries pourraient constituer une voie permettant aux matériaux radioactifs d'atteindre des zones habitées par des populations.

#### **RAPPORT SUR LA FIABILITÉ TECHNOLOGIQUE DU STOCKAGE GÉOLOGIQUE (1999) ET LOI SUR LE STOCKAGE DÉFINITIF (2000)<sup>4</sup>**

L'Institut du cycle du combustible (JNC), devenu l'Agence japonaise de l'énergie atomique (JAEA), a publié un rapport en 1999 qui évalue le dossier de sûreté du stockage géologique. Il montre une conception du site de stockage, des installations et des équipements basée sur le concept d'une combinaison de barrières naturelles et de barrières technologiques. Selon le rapport, « il y a généralement une atmosphère réduite en oxygène (environnement réduit) en grande profondeur et l'écoulement de l'eau est si lent qu'il y aura suffisamment d'espace au Japon pour maintenir le confinement des déchets par rapport aux zones de peuplement humain pendant environ 100 000 ans en recourant à des barrières technologiques. »

Cependant, ils ont étudié l'écoulement de l'eau en grande profondeur en ne prélevant que deux ou trois échantillons. Dans le cas de Mizunami où la JAEA a mené des recherches à des profondeurs de 100 m, 300 m et 500 m, 700 à 1000 m<sup>3</sup> d'eau continuent de s'infiltrer du sol chaque jour depuis 20 ans. Et la JAEA n'a pas encore découvert d'où vient l'eau et où elle va. Cela signifie qu'elle dispose de moins de connaissances sur l'environnement en grande profondeur, notamment sur l'écoulement de l'eau ou les fissures de la roche. Toutefois, jusqu'à présent, la NUMO n'a pas annoncé qu'un site comme Mizunami ne convenait pas à un stockage définitif. En outre, il n'existe pas encore de réglementation sur la conception du site de stockage et sur les normes de sûreté en matière de stockage. La NUMO n'a pas non plus de règlement lui permettant d'abandonner le site même si elle trouve de mauvaises conditions au cours de recherches détaillées ultérieures. Dans de telles situations, la NUMO pourrait effectuer une évaluation dite détaillée et, en conséquence, le site sera déclaré apte au stockage.

#### **ÉVALUATION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL**

Les rapports d'évaluation de l'impact sur l'environnement (EIE) relatifs à aux déchets vitrifiés de haute activité comprennent un scénario de base et des variantes. Dans les deux cas, les eaux souterraines rejettent des matières radioactives dans l'environnement humain. Les conditions préalables du scénario de base sont les suivantes : terrain plat, eau de rivière, roche granitique, 70 % de bentonite + 30 % de sable de silice pour former une couverture, à une profondeur de 1 000 m et à 100 m de fissures à haute perméabilité. Un suremballage est censé confiner les déchets radioactifs pendant 1 000 ans. Et le verre est censé se dissoudre complètement 70 000 ans plus tard. Pendant cette période, les matériaux radioactifs se diffusent lentement avec l'eau à travers une couche de 70 cm d'épaisseur de bentonite/sable de silice et dans un champ proche supposé s'étendre à 100 m. Ensuite, les matériaux pénètrent dans l'environnement humain. Le débit de dose calculé est de 0,005 microsievert par an à son maximum, c'est-à-dire 800 000 ans après la fermeture de l'installation. Les scénarios de variantes de l'EIE contiennent 36 configurations. Trente des 36 configurations correspondent à différentes conditions pour l'eau, les eaux de surface ou l'eau de mer, l'écoulement des eaux souterraines et la nature du sol.

D'autres configurations font varier l'épaisseur du sur-emballage, la vitesse de dissolution du verre, l'état colloïdal, le soulèvement et le tassement de la roche et une mauvaise construction des barrières. Selon les calculs, la dose maximale découlant de ces scénarios reste inférieure à 100 microsievverts par an.

Dans les scénarios de variantes, toutefois, la variation d'une seule condition est prise en compte. Si deux facteurs ou plus changent en même temps, la dose augmentera jusqu'à atteindre 1 mSv/an ou plus. Par exemple, si un séisme élargit les fissures dans la roche, la corrosion du suremballage se produira plus rapidement, la voie d'écoulement de l'eau de la couverture à la surface de la terre changera également et des matières radioactives apparaîtront rapidement de manière inattendue dans notre environnement, puis l'exposition interne au rayonnement dépassera 1 mSv/an.

Un rapport sur l'évaluation de l'impact sur l'environnement des déchets à vie longue et basse température destinés au stockage géologique a été publié en 2005 par ce qui était le JNC à l'époque. Le rapport indique que la dose maximale est estimée à 2  $\mu$ Sv/an à son point culminant, 10 000 ans plus tard, sur la base de conditions géologiques similaires à celles retenues pour les déchets vitrifiés de haute activité. Le nucléide principalement en cause est l'iode 129, qui a une demi-vie de 15,7 millions d'années et qui se dissout facilement dans l'eau.

### **PROCÉDURE DE SÉLECTION DU SITE**

Les dispositions de la loi sur la sélection des sites prévoient une procédure étape par étape: Premièrement, des recherches préliminaires sur la région, portant par exemple sur les tremblements de terre, les risques d'inondations, les éruptions volcaniques, etc., sont effectuées à l'aide de documents de la région. Deuxièmement, une recherche générale est effectuée en procédant à des forages pour obtenir des échantillons, puis des recherches détaillées sont menées sur le sous-sol du site. A chaque étape, la NUMO doit établir un rapport d'évaluation et le communiquer aux populations locales. Les opinions des autorités locales et des gouvernements locaux doivent être « respectées ». La NUMO insiste sur le fait que si l'autorité ou le gouvernement local refuse de passer à l'étape suivante, ils arrêteront les recherches. La NUMO ne fait aucune annonce d'abandon

du site, mais arrête simplement ses recherches. Les gens critiquent cette disposition car ils craignent que la NUMO n'attende les prochaines élections pour tenter d'influencer le nouveau gouverneur ou le nouveau maire, ce qui expliquerait pourquoi ils maintiennent le projet « en attente » au lieu de l'abandonner.

### **LA NUMO ET LE SYSTÈME D'« INVITATION » À CANDIDATURE**

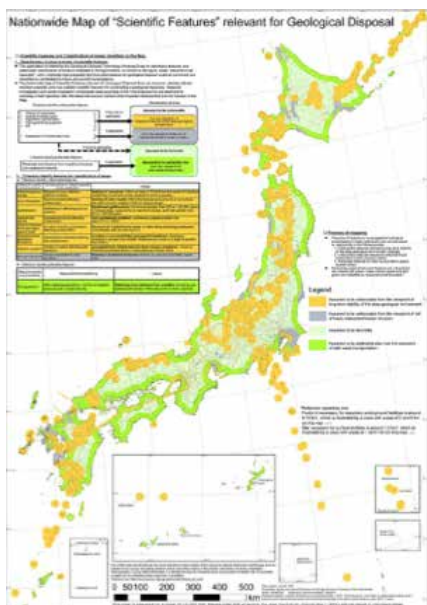
La NUMO, créée par la Loi sur le stockage définitif, a introduit la « procédure d'invitation à candidature » en 2002 et a demandé aux autorités locales de soumettre des dossiers d'acceptation pour participer à la recherche documentaire. La NUMO insiste sur le fait que cette procédure est très équitable car toutes les autorités ont la même possibilité d'accepter les recherches préliminaires. Cinq ans plus tard, le maire de la ville de Toyo, dans la préfecture de Kochi, a demandé que des recherches soient menées, mais sans en discuter avec le conseil ni en avertir les habitants de la ville. La décision de ce maire a déclenché un puissant mouvement contre l'acceptation de la recherche pour la mise en place d'un site d'enfouissement de déchets radioactifs, et le mouvement a réussi à contester le maire. Finalement, un nouveau maire, opposé à la candidature à la recherche, a été élu et il a retiré la candidature de sa ville. Dès que le maire a manifesté son intérêt pour la subvention en acceptant la première phase de la recherche, les mouvements d'opposition se sont rapidement développés et tous les essais expérimentaux ont été abandonnés. Ces événements se sont produits dans huit autres municipalités, en plus de la ville de Toyo. Après l'incident avec la ville de Toyo, des voix ont réclamé de la part des promoteurs du projet une nouvelle approche en matière de sélection du site, et un système dans lequel le gouvernement central prend l'initiative du contact avec les municipalités a été introduit la même année. La catastrophe de Fukushima Daiichi s'est produite alors que la préparation de la demande du gouvernement à plusieurs municipalités venait de s'achever. La subvention versée aux administrations locales, y compris les frais des municipalités, s'élève à un maximum de 2 milliards de yens pour la première étape et à 7 milliards de yens pour la seconde. Le montant de la subvention supplémentaire à la dernière étape n'a pas encore été décidé.

### **PUBLICATION DE LA CARTE DES**

## CARACTÉRISTIQUES GÉO-SCIENTIFIQUES

L'ancien Premier ministre Koizumi, juste après sa visite à « Onkalo » en Finlande, a déclaré que le Japon devrait abandonner progressivement l'énergie nucléaire, car le stockage géologique est impossible pour le Japon en raison de l'instabilité géologique de son territoire. Le gouvernement japonais avait très peur de renforcer le mouvement antinucléaire et a concrétisé l'approche introduite en 2007 pour la sélection d'un site de stockage géologique. En décembre 2013, le gouvernement a annoncé une approche en trois étapes : premièrement, la désignation de zones appropriées sur la base d'informations et de données scientifiques, deuxièmement, l'obtention de l'accord des régions au travers de dialogues, puis la demande aux municipalités de ces régions de mener une recherche documentaire.

Le 28 juillet 2017<sup>5</sup>, le gouvernement japonais a publié une carte des caractéristiques géoscientifiques afin de fournir une base pour la sélection des emplacements des sites de stockage de déchets nucléaires de haute activité. La carte, à une échelle de 1/2 000 000, montre l'ensemble de l'archipel japonais et est accompagnée de cinq cartes aériennes. Les explications sur les points de vue utilisés pour évaluer la disponibilité en surface pour la construction du site sont fournies, ainsi que les critères pour ces points de vue, accompagnés des cartes, qui utilisent un code couleur pour indiquer les différents points de vue. La carte indiquant les zones appropriées classe l'ensemble de la surface du pays en 3 zones : « favorables »,



Référence carte <sup>6</sup>

« appropriées » et « inappropriées » sur la base de onze conditions de disqualification telles que l'activité volcanique, l'activité des failles, le soulèvement ou l'érosion des terres, la présence de ressources minérales, la température dans la zone de stockage, etc. Pour cela, ce sont des données ou des documents nationaux qui ont été utilisés, pas des données et des documents régionaux précis. La carte distingue les zones « favorables », dites zones côtières vertes, des zones « appropriées » en fonction des conditions de transport. Un transport de déchets vitrifiés de haute activité pèse plus de 100 tonnes et il ne peut donc pas utiliser les routes publiques mais nécessite des routes privées spécifiques. La zone côtière verte représente les territoires situés à moins de 20 km de la ligne de littoral. La NUMO planifie et organise les dialogues dans ces zones côtières vertes. Cependant, dès que les cartes ont été publiées par le METI et la NUMO, 21 des 46 gouverneurs locaux ont clairement annoncé qu'ils n'accepteraient pas la recherche documentaire. Au cours de chaque réunion organisée par la NUMO, les participants ont aussi insisté sur le fait que la production de déchets radioactifs devait cesser avant toute discussion sur le stockage.

Les conditions géologiques spécifiques à chaque zone seront examinées dans l'étude documentaire, en se référant aux relevés géologiques, tandis que la carte des caractéristiques n'indique les divisions qu'en fonction des informations disponibles au niveau national. Par conséquent, bien que la carte soit appelée une carte des caractéristiques géoscientifiques, les caractéristiques spécifiques aux différentes zones ne sont pas toujours prises en compte. Par exemple, la carte est censée considérer comme défavorables les zones présentant des dépôts de flux pyroclastiques âgés de moins de 10 000 ans, mais elle ne prend pas en compte toute la gamme des incidences de la coulée pyroclastique provenant d'une éventuelle éruption du volcan Kikai Caldera, dans la préfecture de Kagoshima, dont l'éruption la plus récente a eu lieu il y a 7 300 ans. Cette influence sera prise en compte dans l'étude documentaire. De nombreuses zones de Tokyo sont classées dans les zones côtières vertes, mais comme la plaine de Kanto s'est formée au cours de la période quaternaire, le substrat rocheux est encore meuble en profondeur, et de nombreuses roches non lithifiées peuvent s'y trouver. Cela devra également être pris en compte dans l'étude documentaire.

---

Cette carte des caractéristiques géoscientifiques ne tient pas compte des restrictions imposées à l'utilisation des terres en raison de lois ou de traités internationaux, ni de conditions sociales telles que la densité de population et le nombre de propriétaires fonciers.

Les conditions conventionnelles de la NUMO pour l'acceptation des demandes d'enquête portaient uniquement sur l'activité volcanique et l'activité des failles. Les autres points de vue sont intégrés dans la carte des caractéristiques sociales devant être examinée dans l'étude documentaire. Par conséquent, la publication de la carte constitue un pas en avant pour le gouvernement. La NUMO est en train de modifier les conditions d'acceptation pour qu'elles soient cohérentes avec les conditions décrites dans la carte.

L'archipel japonais se situe dans une zone de mouvement tectonique, où quatre plaques se rencontrent. Même si toutes les conditions représentées sur la carte sont remplies, il restera difficile d'isoler les déchets de l'environnement pendant plus de 100 000 ans. En particulier, les informations sur les quantités relativement importantes d'eaux souterraines profondes, qui devraient être particulièrement prises en compte pour la stabilité à long terme, sont limitées. Le gouvernement a l'intention d'assurer la sécurité à long terme des déchets de haute activité en s'appuyant sur des méthodes d'ingénierie, et cette intention reste inchangée.

Après la publication de la carte des caractéristiques géoscientifiques, le gouvernement et la NUMO ont l'intention d'organiser des activités visant à améliorer la compréhension du public, principalement dans les zones dont les caractéristiques ont été jugées favorables (zones côtières vertes). Cependant, sur les 47 préfectures du pays, 20 préfectures ont déjà refusé l'enquête. Les mouvements de citoyens contre la production d'énergie nucléaire sont puissants depuis l'accident de Fukushima Daiichi, et ces mouvements demandent fermement que toutes les centrales électronucléaires soient d'abord fermées, afin de mettre fin à l'accumulation des déchets de haute activité. Le Conseil scientifique du Japon a également déclaré que la limite supérieure des déchets de haute activité devrait être déterminée (2012).

Le gouvernement indique que la publication de la nouvelle carte des caractéristiques ne vise pas à persuader les municipalités d'accepter une enquête pour la sélection d'un site d'élimination. Il affirme en outre qu'il ne lancera aucune enquête de manière unilatérale sans obtenir l'accord des populations locales. « Il s'agit de la première étape d'un long chemin pour parvenir au stockage définitif des déchets de haute activité. », indique-t-il.

La NUMO prévoit de commencer cette première étape en organisant des réunions de concertation avec un petit nombre de personnes dans les zones jugées favorables à tous points de vue, notamment au niveau du transport. Cependant, le gouvernement et la NUMO ont l'intention de mettre en avant le concept et le plan de stockage géologique des déchets de la façon classique, en séparant le problème du site de stockage du débat sur les centrales nucléaires. Ce désaccord frontal devrait se maintenir.

Le gouvernement ne fait aucun effort pour établir un consensus participatif en matière de gestion des déchets de haute activité. Par exemple, aucune réunion de consensus ni aucun scrutin délibératif n'a été organisé ou prévu. Les conseils gouvernementaux n'ont pas discuté des moyens d'obtenir un accord social. Ce que le gouvernement a tenté de faire jusqu'à présent, c'est de remporter l'adhésion du public à sa politique de stockage géologique. Cependant, ce qu'il a réellement entrepris, c'est d'organiser des rencontres, qualifiées de séances explicatives, dans le but d'obtenir l'accord public sur le plan du gouvernement.

## **CALENDRIER DE LA GESTION DES DÉCHETS DE HAUTE ACTIVITÉ**

En 1995, le premier transport de déchets de haute activité vitrifiés est arrivé de France. Les déchets vitrifiés sont arrivés dans le port privé de Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL) et doivent être entreposés dans le centre de stockage de déchets vitrifiés de Rokkasho-mura pendant 30 à 50 ans en vertu d'un accord conclu entre JNFL et le gouverneur d'Aomori. La NUMO doit donc commencer l'exploitation de son site avant 2045. Il faut environ 30 ans pour atteindre la période d'exploitation, 2 ans pour la recherche documentaire, 4 ans pour la recherche globale, 14 ans pour la recherche détaillée sur site et 10 ans pour la construction.

---

La NUMO a déjà pris 3 ans de retard et il est peu probable qu'elle trouve une municipalité qui accepte les recherches dans un proche avenir. Mais elle ne peut pas changer son calendrier à cause de l'accord avec le gouverneur d'Aomori.

### **ESTIMATION DU COÛT DU STOCKAGE**

Le Ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie (METI) a évalué en 2011 le coût total du stockage, en intégrant les déchets à vie longue et basse température, à 3 800 milliards de yens (environ 29,4 milliards d'euros)<sup>7</sup>. Si le calendrier est retardé de 20 ans ou plus, ce qui est probable, le prix augmentera. En outre, le coût de fonctionnement de la NUMO est également exclu de ce calcul et il augmentera encore le coût du stockage.

### **COLLECTE DES FONDS DESTINÉS AU STOCKAGE DES DÉCHETS**

Le METI et les compagnies électriques collectent les fonds via la vente de l'électricité, mais seulement la moitié des 3 800 milliards de yens seront collectés directement en raison d'un taux d'actualisation de 2%. Chaque année, le METI demande aux compagnies électriques le montant correspondant au coût du stockage basé sur la production d'énergie nucléaire de l'année précédente et évalue le coût du stockage géologique. Les compagnies tiennent compte du taux d'actualisation, mais le coût sera majoré par de nombreux facteurs. Les générations futures seront confrontées à de graves problèmes de financement, mais la facture finale ne leur sera présentée qu'après la fin de l'ère nucléaire.

### **CONCLUSION**

L'accident de Fukushima Daiichi survenu en mars 2011 a renforcé l'opposition publique au nucléaire au Japon. Alors qu'il y avait 54 réacteurs commerciaux disponibles en 2011, en 2018, neuf réacteurs sont en exploitation. Le gouvernement envisage de mettre en service jusqu'à 35 réacteurs d'ici 2030 mais il est presque certain qu'un tel objectif est impossible. L'horizon est bouché pour l'énergie nucléaire au Japon. Dans le même temps, du fait de la politique énergétique japonaise, le pays possède de gros volumes de déchets de haute activité – à la fois du combustible irradié et des déchets de haute activité vitrifiés provenant du retraitement. À ce jour, les efforts visant à mettre en œuvre des sites de stockage pour ces déchets ont échoué et il n'y a aucune perspective d'avancée dans un avenir proche ou même lointain. Les Japonais ont le sentiment d'un devoir moral de gérer de façon sûre les déchets nucléaires générés pour la production d'électricité, ce qui inclut la nécessité de trouver une solution à long terme. Toutefois, d'après un sondage réalisé en 2017 par la Japan Atomic Energy Relations Organization, il est clair que, même si la recherche sur le stockage des déchets nucléaires bénéficie d'un soutien considérable, il est peu probable que cela puisse être fait de façon sûre. Selon ce sondage, l'opinion sur le stockage souterrain est partagée : 20% des personnes y sont favorables, mais le même pourcentage y est opposé. En réalité, lorsque les sites proposés ont été suggérés aux communautés, l'opinion publique s'est massivement opposée au stockage souterrain.

Le stockage géologique est dangereux, en particulier dans un pays sismiquement/tectoniquement actif comme le Japon. La réalité est que les déchets nucléaires de haute activité continueront à être stockés en surface dans un avenir prévisible, comme cela devrait se faire. Il n'y a pas de solution pour le stockage définitif des déchets nucléaires de haute activité au Japon. En 2010, le Bureau du Cabinet japonais a demandé que le Conseil scientifique du Japon présente son analyse sur les options en matière de stockage des déchets nucléaires de haute activité. Après avoir examiné l'état de la recherche sur le stockage des déchets au Japon, le Conseil, en septembre 2012, avait recommandé au gouvernement de l'époque que l'entreposage provisoire des déchets de haute activité soit envisagé pendant une période de 300 ans. C'est une reconnaissance de la réalité du problème de la gestion des déchets de haute activité au Japon, et le gouvernement et la NUMO devraient accepter cette recommandation<sup>8</sup>.

- 
- 1 CNIC Seminar report: The problems with Japan's Plutonium: What are they and how do we deal with them? CNIC, 4 juin 2018 ; et Frank von Hippel et Masa Takubo, «An alternative to the continued accumulation of separated plutonium in Japan: Dry cask storage of spent fuel, septembre 2018, [https://www.researchgate.net/publication/327927769\\_An\\_alternative\\_to\\_the\\_continued\\_accumulation\\_of\\_separated\\_plutonium\\_in\\_Japan\\_Dry\\_cask\\_storage\\_of\\_spent\\_fuel](https://www.researchgate.net/publication/327927769_An_alternative_to_the_continued_accumulation_of_separated_plutonium_in_Japan_Dry_cask_storage_of_spent_fuel)
  - 2 CNIC Seminar report: The problems with Japan's Plutonium: What are they and how do we deal with them? CNIC, 4 juin 2018 ; et Frank von Hippel et Masa Takubo, «An alternative to the continued accumulation of separated plutonium in Japan: Dry cask storage of spent fuel, septembre 2018, [https://www.researchgate.net/publication/327927769\\_An\\_alternative\\_to\\_the\\_continued\\_accumulation\\_of\\_separated\\_plutonium\\_in\\_Japan\\_Dry\\_cask\\_storage\\_of\\_spent\\_fuel](https://www.researchgate.net/publication/327927769_An_alternative_to_the_continued_accumulation_of_separated_plutonium_in_Japan_Dry_cask_storage_of_spent_fuel)
  - 3 Actions NUMO is Taking to Promote Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. 12 avril 2018. Shunsuke Kondo President, Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO), voir <https://www.numo.or.jp/topics/1-4Kondo.pdf>
  - 4 "Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan", [https://www.jaea.go.jp/04/tisou/english/report/H12\\_report.html](https://www.jaea.go.jp/04/tisou/english/report/H12_report.html)
  - 5 Government releases a geoscientific characteristics map showing areas «suitable» for disposal of high-level nuclear waste, CNIC\_4 octobre 2017
  - 6 Map reference - Actions NUMO is Taking to Promote Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, 12 avril 2018. Shunsuke Kondo President, Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO), voir <https://www.numo.or.jp/topics/1-4Kondo.pdf>
  - 7 Au Japon, le coût du stockage des déchets a été estimé en 2011 à 29 milliards d'euros par le Ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie (METI).
  - 8 Conseil scientifique du Japon, Le stockage des déchets radioactifs de haute activité, septembre 2012, voir <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-k159-1.pdf#page=1> (en japonais).

5

**SUÈDE ET  
FINLANDE**



# LA GESTION DU COMBUSTIBLE USÉ DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES EN SUÈDE ET EN FINLANDE

Miles  
Goldstick

## INTRODUCTION

Ce rapport est consacré à la situation de la gestion du combustible nucléaire irradié, généralement appelé combustible usé, provenant des réacteurs électronucléaires commerciaux en Suède. Nous nous intéressons en particulier aux incertitudes et aux impacts de la méthode et du lieu proposés par l'industrie nucléaire pour un site de stockage des combustibles usés. Nous aborderons également brièvement la situation en matière de gestion du combustible usé en Finlande.

## GESTION DES DÉCHETS NUCLÉAIRES EN SUÈDE

En Suède, la création de déchets nucléaires a commencé avec des recherches sur les armes nucléaires peu après le largage des bombes atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki en 1945. En 1947, le gouvernement suédois a créé la Compagnie de l'énergie atomique afin de poursuivre des activités de recherche et de développement dans le domaine nucléaire militaire et civil. Les travaux sur le nucléaire militaire ont été abandonnés à la fin des années 1960<sup>1</sup>. Les premières recherches réalisées à la fin des années 1940 ont notamment utilisé du plutonium, ce qui a entraîné une contamination et la production de déchets radioactifs. Comme en Suède la chaîne du combustible nucléaire compte maintenant plusieurs installations, certaines en exploitation et d'autres à l'arrêt, il existe également plusieurs types de déchets nucléaires qui sont gérés de différentes manières.

En Suède, il y a une mine d'uranium déclassée (à Ransstad), une usine de fabrication de combustible (à Västeraås), un réacteur de recherche militaire définitivement arrêté (R1 à Stockholm), un petit réacteur commercial (R3 à Ågesta) également définitivement arrêté, un réacteur plutonigène à usage militaire qui n'a jamais été chargé en combustible (R4 à Marviken), quatre centrales nucléaires commerciales (Barsebäck, Ringhals, Oskarshamn et Forsmark) avec un total de 12 réacteurs nucléaires (la centrale de Barsebäck compte deux réacteurs définitivement arrêtés, deux des trois réacteurs d'Oskarshamn sont définitivement arrêtés, l'un des quatre réacteurs de Ringhals devrait être fermé en 2019 et un autre en 2020), une installation en exploitation pour le stockage de déchets radioactifs « à vie courte » (SFR à Forsmark), et une installation d'entreposage provisoire du combustible usé (Clab à Oskarshamn, 32 m sous terre dans la roche). Il existe également une installation d'essai et de traitement (Studsvik, près de

Nyköping). La question du combustible usé et des autres déchets produits par les programmes de recherche n'est pas spécifiquement abordée ici. Aucune activité de conversion du yellowcake, d'enrichissement du combustible ou de retraitement n'est réalisée en Suède. La Suède a toutefois envoyé des combustibles usés pour retraitement à Sellafield en Angleterre (140 tonnes) et à La Hague en France (57 tonnes). La construction des réacteurs nucléaires commerciaux a commencé dans les années 1960. Six réacteurs ont été mis en service dans les années 1970 et, en 1985, six autres étaient en exploitation<sup>2</sup>.

En 1980, après les résultats d'un référendum non contraignant sur l'avenir de l'énergie nucléaire, le gouvernement a pris la décision d'éliminer progressivement l'énergie nucléaire avant 2010 au plus tard, tout en autorisant la construction d'un maximum de 12 nouveaux réacteurs<sup>3</sup>. Le débat sur l'avenir de l'énergie nucléaire s'est poursuivi et la date de sortie du nucléaire de 2010 a été conservée jusqu'au milieu des années 90. Ensuite, dans un nouvel accord entre les partis, le gouvernement a décidé d'engager la sortie plus tôt, mais a abandonné l'échéance de 2010. Le premier réacteur (Barsebäck-1) a été arrêté en 1999 et le second (Barsebäck-2) en 2005.

La controverse a continué<sup>4</sup>. En juin 2010, après un vote au parlement qui n'a remporté que deux votes supplémentaires (174 à 172), la législation sur l'abandon progressif du nucléaire a été abandonnée et la construction de nouveaux réacteurs de nouveau autorisée. En juin 2016, un autre accord entre les parties a été conclu, cette fois sur la politique énergétique en général<sup>5</sup>. L'objectif actuel est que la production d'électricité soit fournie à 100% par des sources d'énergie renouvelables d'ici 2040. Cependant, les exploitants de réacteurs ont annoncé qu'ils demanderaient une prolongation de la durée de vie de six réacteurs jusqu'au début des années 2040.

Depuis le milieu des années 1970, l'industrie nucléaire et les pouvoirs publics consacrent d'importants moyens financiers à la gestion à long terme de l'ensemble des déchets nucléaires, en particulier du combustible irradié. On trouvera ci-après une description de la situation en matière de gestion des combustibles usés et des installations actuelles et proposées pour les déchets nucléaires de faible et moyenne activité.

L'installation prévue par l'industrie pour les déchets de faible et moyenne activité « à vie longue », appelée « SFL », en est au début du processus de planification et n'est pas abordée ici (SKB prévoit de soumettre une autorisation pour SFL vers 2030).

## GESTION DES COMBUSTIBLES USÉS

La loi suédoise précise que le producteur de déchets nucléaires est responsable de leur gestion et doit en couvrir les coûts (principe pollueur-payeur). Pour gérer les déchets nucléaires, les exploitants de centrales nucléaires ont fondé ensemble la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (*Svensk Kärnbränslehantering AB - SKB*). Ces exploitants nucléaires, avec leur participation respective dans SKB, sont les suivantes: Vattenfall AB (36 %), Forsmarks Kraftgrupp AB (30 %), OKG Aktiebolag (22 %) et Sydkraft Nuclear Power AB (12 %)⁶. Vattenfall AB appartient en totalité à l'État suédois⁷.

La « Loi suédoise sur l'accès aux informations publiques et sur le secret » offre une solide législation sur l'accès à l'information. Il existe des procédures bien établies pour permettre au public de demander et recevoir une grande partie des informations gérées par tous les niveaux des pouvoirs publics et des administrations publiques. Comme SKB est une société privée, ce domaine du droit ne s'applique pas à son travail sur la question des déchets nucléaires. Il en résulte un manque de transparence.

## QUANTITÉS ACTUELLES ET PRÉVUES DE COMBUSTIBLE USÉ

D'après SKB, les 12 réacteurs nucléaires commerciaux indiqués ci-dessous (qui ne fonctionnent pas tous), ont généré jusqu'en 2016 un total de 7 860 tonnes de combustible irradié, et la quantité totale prévue est de 11 404 tonnes (en quantité d'uranium dans les deux cas)⁸.

« Données d'exploitation, production d'électricité et quantités de combustible sur la base de l'exploitation prévue. »

Source: SKB. 2017-04. « Plan 2016. Costs from and including 2018 for the radioactive residual products from nuclear power. Basis for fees and guarantees for the period 2018-2020. » Technical Report TR-17.02. 52 pp. Voir p. 35. Consulté le 5 octobre 2018 sur: <https://www.skb.se/publikation/2487964/TR-17-02.pdf><https://www.skb.se/publikation/2487964/TR-17-02.pdf>

Une partie du combustible utilisé provenant des réacteurs de recherche est incluse dans la demande pour KBS-3 mais n'est pas incluse dans la quantité estimée en tonnes, bien qu'elle soit intégrée dans l'estimation du nombre de conteneurs.

Start of commercial operation	Thermal capacity/net capacity	Electricity production up to and including 2016	Fuel up to and including 2016	Total for planned operation		Electricity production	Spent nuclear fuel
				Planned operating time	Operation up to and including		
	MW	TWh	Tonnes of uranium	Years		TWh	Tonnes of uranium
F1 (BWR) 10/12/1980	2928/984	251	883	60.0	08/12/2040	434	1348
F2 (BWR) 07/07/1981	3253/1120	245	864	60.0	05/07/2041	462	1418
F3 (BWR) 22/08/1985	3300/1167	270	897	60.0	20/08/2045	536	1509
O1 (BWR) 06/02/1972	1375/473	81	367	45.4	30/05/2017	82	367
O2 (BWR) 15/12/1974	1800/638	154	537	41.1	31/12/2015	154	537
O3 (BWR) 15/08/1985	3900/1400	256	841	60.0	14/08/2045	568	1577
R1 (BWR) 01/01/1976	2540/881	197	720	44.5	14/05/2020	219	773
R2 (PWR) 01/05/1975	2500/807	210	630	44.2	13/07/2019	224	671
R3 (PWR) 08/09/1981	3135/1063	225	607	60.0	07/09/2041	421	1126
R4 (PWR) 21/11/1983	3300/1118	217	672	60.0	20/11/2043	444	1235
B1 (BWR) 01/07/1975	1800/600	93	419	30/11/1999		93	419
B2 (BWR) 01/07/1977	1800/600	108	424		31/05/2005	108	424
BWR total	22696/7863	1657	5951			2656	8372
PWR total	8935/2988	651	1909			1089	3032
All total	31631/10851	2308	7860			3746	11404

The fuel's actual weight in the form of complete fuel assemblies is considerably larger. A BWR fuel assembly weighs about 300 kg whereas about 180 kilograms consist of uranium. After burn-up, the uranium weight decreases slightly. For a PWR fuel assembly, the corresponding weights are about 560 kg and about 460 kg respectively.

## **FINANCEMENT ET PROGRAMME TRIENNAL DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT**

En 2017, SKB a estimé à 98 milliards SEK (environ 9,5 milliards d'euros) le total des coûts futurs jusqu'au moment de la fermeture de l'ensemble des installations qui gèrent les déchets nucléaires provenant de réacteurs nucléaires, dont 31,56 milliards SEK (environ 3 milliards d'euros) pour le combustible usé<sup>9</sup>. La majeure partie des fonds destinés à la gestion et au stockage futurs des déchets nucléaires provient de fonds versés conformément à la loi par l'industrie nucléaire au Fonds pour les déchets nucléaires qui est géré par le gouvernement<sup>10</sup>. Fin 2017, le fonds s'élevait à 67,236 milliards de SEK (environ 6,45 milliards d'euros)<sup>11</sup>. SKB a estimé que les dépenses totales engagées par le Fonds pour les déchets nucléaires de 1982 à fin 2017 s'élevaient à environ 4,8 milliards de SEK (environ 460 millions d'euros)<sup>12</sup>, ce qui représente une moyenne d'environ 190 millions de SEK (environ 18,22 millions d'euros) par an.

Selon les décrets gouvernementaux, les versements annuels sont soumis, depuis 1986, à un examen des rapports de recherche et développement triennaux de l'industrie nucléaire couvrant une période de quatre ans à l'avance<sup>13</sup>. Il convient toutefois de noter que, bien que le gouvernement ait approuvé de manière implicite ou explicite dans les 12 rapports triennaux jusqu'à aujourd'hui la méthode KBS-3 à des fins de démonstration et de planification, le gouvernement a clairement indiqué que la méthode elle-même n'avait pas été approuvée<sup>14</sup>. Il faut aussi remarquer que l'agence gouvernementale chargée d'examiner les rapports triennaux a recommandé, après chaque examen, son acceptation par le gouvernement, bien qu'elle ait signalé des lacunes. Cette agence gouvernementale, l'Autorité suédoise de sûreté radiologique (SSM) (depuis sa création en 2008 et auparavant ses prédécesseurs), est la même agence qui a eu pour tâche d'examiner la demande par l'industrie nucléaire en 2011 de construire une installation dont le concept continue d'être développé dans chacune de ces revues triennales. Comme décrit ci-après, cette demande a également été examinée par le Tribunal foncier et de l'environnement.

## **L'EXAMEN EN COURS PAR LES TRIBUNAUX ET LES AUTORITÉS DE CONTRÔLE**

Une demande de SKB visant à construire un système souterrain de gestion du combustible usé utilisant la méthode KBS-3 (voir encadré) est officiellement examinée en ce moment<sup>15</sup>. On trouvera ci-dessous un résumé des différents jalons et phases du processus de prise de décision. Il faudra au moins jusqu'à la fin de 2020 pour parvenir à la décision finale, mais cela pourrait prendre encore plusieurs années de plus. Si le gouvernement donne son approbation, il restera à mettre en place une réglementation détaillée.

### **MÉTHODE KBS-3 ET SYSTÈME DE GESTION DES COMBUSTIBLES USÉS, SITE PROPOSÉ ET PRINCIPALES INCERTITUDES**

Il n'existe aucune installation opérationnelle dans le monde, utilisant quelque méthode que ce soit, conçue pour stocker définitivement le combustible irradié produit par des réacteurs électronucléaires. Pour gérer le combustible usé, l'industrie nucléaire privilégie partout dans le monde une méthode appelée « stockage en couche géologique profonde », dont la méthode KBS-3 est une variante<sup>16</sup>. L'industrie nucléaire finlandaise a adopté la méthode KBS-3 (pour plus d'informations, se reporter à la section consacrée à la Finlande).

Dans ce contexte, « profond » signifie plusieurs centaines de mètres sous la surface. Une profondeur de plusieurs kilomètres est appelée « très profonde ». Elle correspond à la profondeur proposée pour l'approche alternative que l'on appelle « méthode du forage en grande profondeur ». La pertinence de la méthode KBS-3 par rapport à d'autres méthodes a été débattue en Suède depuis son introduction. Il est proposé de poursuivre les recherches sur des options alternatives: l'entreposage à sec dans une installation hautement sécurisée sur site, dans des centrales nucléaires (par ex. entreposage renforcé sur site - HOSS<sup>17</sup>) ou dans un lieu central (par exemple, entreposage dans des roches sèches - DRD<sup>18</sup>) et les forages très profonds. Une gestion permanente peut être appliquée avec toutes les méthodes mais les exigences de surveillance sont limitées dans le cas du stockage à très grande profondeur et importantes dans le cas de l'entreposage à sec.

Le sigle **KBS** renvoie au projet «*KärnbränsleSäkerhet*» («*Sûreté du combustible nucléaire*») de 1976 créé par la société suédoise Nuclear Fuel Supply Co. (*Svensk kärnbränsleförsörjning AB*) (SKBF), qui précédait la Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (*Svensk Kärnbränslehantering AB*) (SKB).

**KBS-1 (1977) gérait le combustible nucléaire retraité et a rapidement été abandonné en raison des problèmes liés au retraitement.**

**KBS-2 (1979)** est la première description du stockage direct de combustible nucléaire.

**KBS-3 (1983)**<sup>19</sup> est la deuxième description, plus détaillée, d'un site de stockage situé à plusieurs centaines de mètres de profondeur et reposant sur les trois barrières des conteneurs en cuivre, de l'argile bentonite et de la roche elle-même. Les conteneurs en cuivre et l'argile bentonite sont interdépendants, c'est-à-dire que l'un ne fonctionnera pas si l'autre ne fonctionne pas de manière optimale.

## **LA MÉTHODE KBS-3 ET LE SYSTÈME DE GESTION DES COMBUSTIBLES USÉS COMPRENNENT LES ÉLÉMENTS SUIVANTS :**

- Entreposage sous l'eau pendant environ un an sur site, dans la centrale nucléaire.

- Entreposage pendant environ 30 ans dans les installations souterraines du Clab, situées à Oskarshamn et actuellement en fonctionnement. Le Clab nécessite un refroidissement actif dépendant d'un approvisionnement électrique. La communauté locale, la municipalité d'Oskarshamn, souhaite que l'installation soit mise à l'arrêt. Le Clab ne disposera peut-être pas de la capacité nécessaire pour accueillir la quantité de combustible usé prévue. Pour cette raison, SKB a étudié la possibilité d'utiliser un entreposage temporaire à sec si, pendant une période, l'espace disponible est insuffisant dans le Clab et qu'un stockage définitif n'est pas encore possible dans un site KBS-3.

- Un système multi-barrières est prévu pour retarder le rejet de radionucléides, avec trois composants : un substrat rocheux granitique, un tampon de bentonite et une encapsulation dans des conteneurs en cuivre avec des cylindres intérieurs en fonte. Toutes ces barrières suscitent des préoccupations, comme on le verra plus loin.

- Une installation d'encapsulation est proposée, qui serait située immédiatement à côté du Clab, l'ensemble étant appelé «*Clink*».

- Environ 5 700 colis prévus<sup>20</sup>.

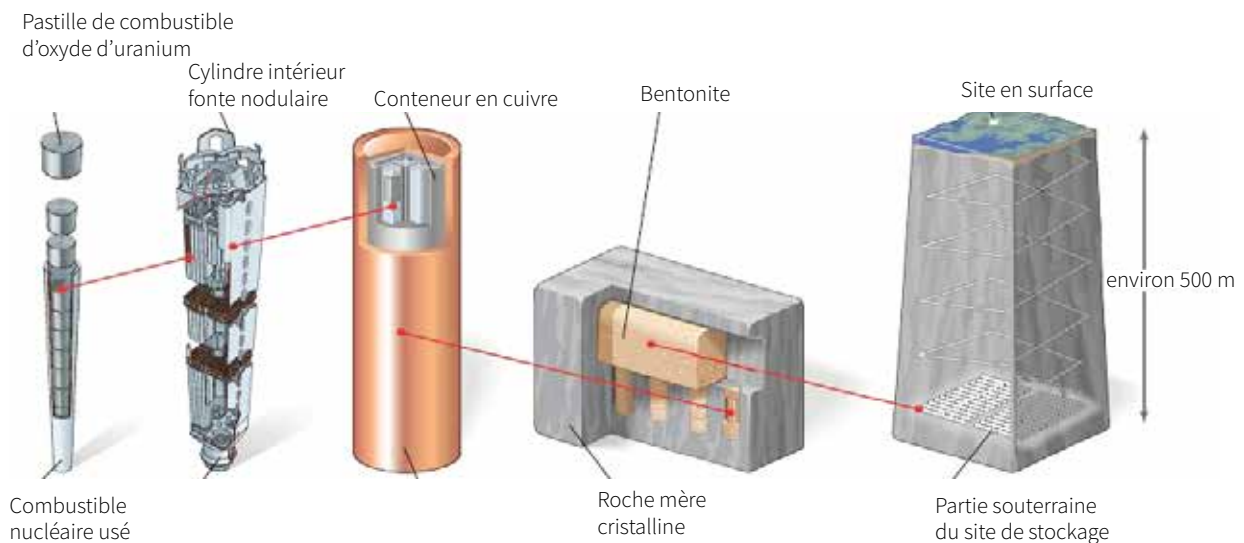
- Les dimensions du conteneur sont les suivantes : diamètre extérieur 1,05 m, longueur 4,85 m, épaisseur de la paroi en cuivre 4,9 cm, poids maximal moyen d'environ 23,9 tonnes<sup>21</sup>.

- Mise en place des conteneurs dans le substrat rocheux à 470 m sous la surface, dans des trous circulaires verticaux de huit mètres de profondeur et de deux mètres de diamètre. Le site proposé est à Forsmark, à environ un kilomètre des trois réacteurs nucléaires de Forsmark. La profondeur pourrait ne pas être suffisante pour résister au permafrost lors de la prochaine période glaciaire<sup>22</sup>. L'impact des bactéries à la profondeur des conteneurs est également un sujet de préoccupation. De plus, l'emplacement pourrait ne pas être approprié en raison de conditions géologiques et géophysiques, par ex. le risque sismique. De plus, des risques sont liés à la proximité de la centrale nucléaire de Forsmark.

L'implantation dans une zone côtière augmente également le risque de contamination de la mer Baltique qui, selon HELCOM, est l'une des mers les plus radioactives du monde<sup>23</sup>.

- Les conteneurs sont entourés d'argile bentonite. Plusieurs processus pourraient porter atteinte au tampon d'argile, notamment en raison de l'exposition à l'eau, à la chaleur et à l'air. Par exemple, il faut de l'eau pour que l'argile gonfle et protège le conteneur de cuivre. La roche à Forsmark est cependant relativement sèche et le gonflement pourrait prendre plus de mille ans. Du fait de la chaleur dégagée par les conteneurs pendant cette longue période, l'argile sera peut-être sèche et ne gonflera jamais autant que nécessaire.

- Remplissage des galeries souterraines jusqu'à la surface, fermeture et abandon du site par l'industrie nucléaire, sans la mise en place d'aucune méthode de surveillance. Il existe un risque à long terme d'intrusion involontaire ou volontaire. On peut également se demander si un système de surveillance doit être prévu ou non, et comment préserver les connaissances à long terme sur l'emplacement du site et les dangers des matériaux stockés.



Source : SKB. 2011-03. « Environmental Impact Statement, Interim storage, encapsulation and final disposal of spent nuclear fuel. » 337 pp. Voir Figure s-2, p. 12. Consulté le 5 octobre 2018 : <http://www.skb.com/future-projects/the-spent-fuel-repository/our-applications/> (PDF, 37,3 MB). Lien direct : <http://www.skb.com/wp-content/uploads/2016/03/21014-MKB-ENG-webb-150dpi.pdf>

La méthode KBS-3. « Le procédé consiste à encapsuler le combustible usé dans des conteneurs en cuivre qui sont ensuite mis en place, entourés d'un tampon d'argile bentonite, dans des forages de stockage, dans un réseau de galeries à une profondeur d'environ 500 mètres dans le substrat rocheux. »

## CORROSION DU CUIVRE

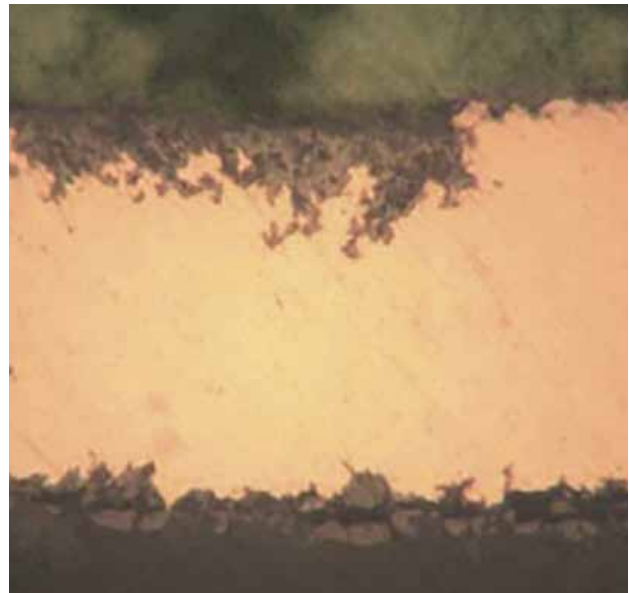
La sûreté de la méthode KBS-3 repose sur un certain nombre d'hypothèses de principe, notamment que le matériau du conteneur, le cuivre, se corrodera si lentement que les radionucléides ne seront pas libérés pendant la période où les déchets sont dangereux pour les êtres vivants. Le cuivre a été choisi comme matériau dans les années 1970 en raison de sa résistance bien connue à la corrosion<sup>24</sup>. Dans certains environnements, le cuivre n'est pas touché par la corrosion, comme le prouvent les formations géologiques contenant du cuivre. Il n'est toutefois pas possible de reproduire de tels environnements en raison de la présence d'eau et d'air dans n'importe quel dispositif ouvragé. La question qui se pose dans ce cas, ce n'est pas si la corrosion du cuivre aura lieu mais à quelle vitesse elle s'opérera. L'Autorité suédoise de radioprotection a réalisé une évaluation détaillée et continue d'étudier ces problèmes<sup>25</sup>. Plusieurs facteurs influencent la vitesse de corrosion du cuivre. Les principaux facteurs sont la capacité du tampon de bentonite à isoler le cuivre de l'eau et de l'air et les processus chimiques qui en résultent, ainsi que la manière dont ces processus sont influencés par la chaleur, la radioactivité et la présence ou non d'oxygène<sup>26</sup>. Le Tribunal foncier et de l'environnement suédois a identifié cinq problèmes principaux (voir ci-après).

En raison de la complexité des facteurs responsables de la corrosion, il n'est pas certain que le cuivre et le fer soient des matériaux appropriés. Des recherches indépendantes de l'industrie nucléaire ont montré que des fuites dues à la corrosion du cuivre pourraient commencer après 100 ans et que la plupart des conteneurs subirait des fuites après environ 1 000 ans<sup>27</sup>. En outre, aucun essai simulant le système envisagé avec du combustible usé dans un conteneur n'a été effectué<sup>28</sup>.



**Ci-dessus :** Apparence du cuivre après 15 ans d'exposition à de l'eau distillée à la température ambiante. L'hydrogène résultant de la corrosion peut s'échapper du récipient de gauche mais pas du récipient de droite. Le volume d'eau était égal dans les deux flacons au début de l'exposition.

**Ci-dessous :** Coupe transversale optique d'une zone verte visible dans le flacon de gauche au-dessus de la feuille de cuivre métallique, initialement de 100  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, après 15 ans d'exposition à de l'eau distillée. Une attaque de corrosion localisée est clairement visible.



---

## LA FAMILLE NUCLÉAIRE

On peut considérer que l'examen juridique en cours a commencé en 2002, lorsque SKB a lancé le processus de consultation exigé pour sa demande d'autorisation de création. Un grand nombre des personnes qui ont participé à cet examen juridique sont des vétérans qui suivent la question de la gestion du combustible usé depuis le milieu des années 70, lorsque l'industrie nucléaire a présenté pour la première fois le concept de KBS. À partir de 2002, les interactions entre l'ensemble des parties prenantes se sont intensifiées. Globalement, il y a eu plus d'une douzaine de réunions par an avec toutes les parties prenantes présentes, alors qu'avant, le public et les ONG environnementales étaient souvent exclus. Il y a donc eu de nombreuses opportunités d'interactions entre toutes les parties prenantes. Cela a conduit, au début des années 2000, à qualifier les participants habituels à ces réunions de « famille nucléaire ».

Les organisateurs des réunions ont souvent fait un effort particulier pour attirer toutes les parties prenantes. Le Conseil des déchets nucléaires, un comité nommé par le gouvernement, a généralement invité au moins une fois par an les organisations parties prenantes, à l'exception de SKB, à envoyer quelques représentants à une table-ronde sur les priorités en cours.

## LE PROCESSUS DE PRISE DE DÉCISION ET LES DATES CLÉS

### 1 — CONSULTATION PUBLIQUE

Entre 2002 et 2014. À partir de 2005, le Fonds pour les déchets nucléaires a mis à disposition des ONG environnementales un financement pour leur permettre de participer au processus de consultation publique. Les municipalités impliquées dans les études de site ont commencé à recevoir un financement du Fonds pour les déchets nucléaires vers 2001. En 2007, l'Agence suédoise pour la gestion publique (*Statskontoret*), l'agence gouvernementale chargée de l'analyse et de l'évaluation des activités de l'État ou financées par l'État, a évalué le soutien apporté aux ONG. Ceci a conduit à recommander la poursuite du financement<sup>29</sup>. Ce dernier a continué jusqu'à aujourd'hui mais, en 2017, il a commencé à provenir du budget global du gouvernement et non plus du Fonds pour les déchets nucléaires.

### 2 — SOUMISSION OFFICIELLE DES DEMANDES D'AUTORISATION

16 mars 2011. La loi exige que les demandes soient présentées en fonction de deux domaines de droit, ainsi que dans le respect des lois qui relèvent du comté et de la municipalité. L'un de ces domaines de droit est le code de l'environnement, qui est traité par le Tribunal du foncier et de l'environnement (*Mark- och miljödomstolen*) (MMD), qui examine les impacts environnementaux en général, notamment les impacts sur la santé humaine. L'autre domaine du droit est la Loi sur les activités nucléaires, qui est traitée par l'Autorité suédoise de sûreté radiologique (*Strålsäkerhetsmyndigheten*) (SSM) et est spécialisée dans les questions de radioprotection. L'ensemble des demandes comprend environ 9 000 pages (à l'exclusion d'informations supplémentaires communiquées ultérieurement), dont environ 2 000 pages se recourent.

### 3 — ÉVALUATION DES DEMANDES EN TERMES D'EXHAUSTIVITÉ

Au cours de cette phase, la SSM et le MMD ont mené des séries de consultations publiques au cours desquelles le public a été invité à présenter des observations sur l'intégralité des documents de la demande initiale, puis sur les réponses de SKB, qui comprenaient des informations supplémentaires demandées à la fois par la SSM et le MMD ainsi que celles fournies de la propre initiative de SKB.

---

#### **4 — PUBLICATION DES DEMANDES D'AUTORISATION MISES EN CONSULTATION PUBLIQUE**

29 janvier 2016 par la SSM et le MMD. La consultation qui a suivi a donné lieu à de nouvelles séries de commentaires du public.

#### **5 — AUDITIONS FORMELLES, JURIDIQUES, PUBLIQUES ET ORALES ORGANISÉES PAR LE MMD**

Des auditions ont été organisées pendant cinq semaines en septembre et octobre 2017, dont trois à Stockholm et une semaine dans chacune des municipalités d'Östhammar et d'Oskarshamn, ainsi que des inspections sur place des deux sites. Au cours de ces auditions, des scientifiques indépendants qui avaient soumis des contributions ont estimé que la demande ne devait pas être approuvée en raison des incertitudes dans leur domaine de compétence spécifique. Toutes les ONG environnementales et les membres du grand public qui ont participé ont également estimé que la demande ne devait pas être approuvée, pour diverses raisons, notamment la dimension morale et éthique. Un grand nombre des scientifiques indépendants et des représentants d'ONG environnementales étaient des participants qui suivaient la question des déchets nucléaires depuis les années 1970. La municipalité d'Oskarshamn a exprimé son soutien à la proposition et la municipalité d'Östhammar a refusé de prendre position.

#### **6 — DÉCLARATIONS FINALES AU GOUVERNEMENT PAR LA SSM ET LE MMD**

23 janvier 2018. Ces déclarations ne peuvent faire l'objet d'un appel dans le système judiciaire. Reuters a rapporté le même jour que la ministre de l'Environnement et de l'Énergie, Karolina Skog, avait déclaré qu'aucune décision ne serait prise en 2018<sup>30</sup>. Cette position était attendue du fait de la date des élections législatives suédoises, fixées au 9 septembre 2018. La municipalité d'Östhammar avait prévu un référendum non contraignant le 4 mars 2018. Quelques heures à peine après l'annonce du « non » par le MMD, le 23 janvier 2018, la municipalité d'Östhammar a annulé son référendum, déclarant qu'elle réexaminerait la nécessité d'un référendum ultérieurement. La SSM avait examiné les projets de l'industrie nucléaire depuis sa création en 2008 et avait hérité de la responsabilité des organismes qui avaient précédé l'Agence. Pour le MMD, cet examen a été une première mondiale pour un tribunal.

#### **7 — PREMIER EXAMEN PAR LE GOUVERNEMENT**

A commencé le 23 janvier 2018 et est actuellement en cours. Le gouvernement a nommé un groupe de travail qui a demandé à SKB d'apporter des commentaires sur certaines informations avant le 30 avril 2019. Parallèlement à cet examen par le gouvernement, un examen spécial de la Loi sur les activités nucléaires est prévu, qui devrait être achevé en avril 2019 au plus tard.

#### **8 — DEMANDE DU GOUVERNEMENT À LA MUNICIPALITÉ CONCERNÉE DE PRENDRE UNE DÉCISION CONCERNANT LA LICÉITÉ**

Si le gouvernement ne rejette pas d'emblée la demande de SKB, avant de prendre sa décision, appelée décision sur la licéité, il doit demander aux municipalités locales d'Östhammar et d'Oskarshamn si elles autoriseront l'activité locale concernée. Si une municipalité dit non, mais que le gouvernement souhaite approuver l'autorisation, ce dernier peut néanmoins donner son approbation sous certaines conditions, c'est-à-dire forcer la municipalité à accepter l'installation. Bien que le gouvernement n'ait pas encore communiqué avec les deux municipalités à ce sujet, le 11 juin 2018, la municipalité d'Oskarshamn a donné son approbation au gouvernement pour la poursuite de l'exploitation de l'installation de stockage provisoire du Clab et pour la construction de l'installation d'encapsulation, appelée Clink. La municipalité d'Östhammar a déclaré qu'elle attendrait que le gouvernement prenne contact avec elle et pourrait organiser un référendum municipal non contraignant avant de prendre une décision.

#### **9 — EXAMEN FINAL ET DÉCISION DU GOUVERNEMENT**

Au cours de cette phase, le gouvernement a le pouvoir de décider si un débat parlementaire complet aura lieu ou non. Les ministres précédents et certains membres du Parlement ont déclaré qu'ils étaient favorables à un débat parlementaire complet. Si le gouvernement donne son approbation, il est possible de faire appel de la décision devant la Cour administrative suprême. Des juristes spécialisés en droit de l'environnement ont souligné que, sans données suffisantes, l'approbation du gouvernement ne serait pas conforme au Code de l'environnement, en raison par exemple de l'incertitude quant aux risques de corrosion des réservoirs en cuivre<sup>31</sup>.



---

## 10 — RÉGLEMENTATION DE LA MISE EN ŒUVRE EN CAS D'APPROBATION PAR LE GOUVERNEMENT

Si le gouvernement donne son approbation, la demande de l'industrie nucléaire est renvoyée à la fois à la SSM et au MMD, qui doivent définir les conditions de mise en œuvre conformément à leurs domaines de droit respectifs. L'industrie nucléaire est tenue de respecter ces conditions. En théorie, une condition pourrait être si stricte que l'industrie ne serait pas en mesure de s'y conformer. Les conditions fixées par le MMD peuvent faire l'objet d'un recours devant une juridiction supérieure. L'industrie peut demander à pouvoir poursuivre sans entraves la mise en œuvre de son projet au cours d'un processus d'appel. Une fois la mise en œuvre commencée, le conseil d'administration du comté (*Länsstyrelsen*) et l'Agence de protection de l'environnement (*Naturvårdsverket*) sont responsables du contrôle du respect du Code de l'environnement. L'Autorité de sûreté radiologique surveille le respect de la Loi sur les activités nucléaires.

### DÉCIDER MALGRÉ LES INCERTITUDES

« Décider malgré les incertitudes » : tel est le titre du Rapport annuel 2018 sur l'état des connaissances en matière de déchets nucléaires publié par le Conseil suédois des déchets nucléaires. Ce conseil est un comité d'experts nommés par le gouvernement pour « clarifier les questions relatives aux déchets nucléaires, au déclassé et au démantèlement des installations nucléaires et pour conseiller le gouvernement sur ces questions »<sup>32</sup>.

Le sujet, auquel environ 118 pages sont consacrées, et le titre du rapport ont été bien choisis car au moment de la rédaction de celui-ci, plus de 40 ans après le début du projet KBS, il existe un consensus général parmi toutes les parties prenantes, à quelques exceptions près, sur le fait qu'il y a beaucoup d'incertitudes. Parmi les parties prenantes qui partagent ce terrain d'entente figurent à la fois des partisans et des opposants à la proposition de l'industrie en cours d'examen : l'industrie nucléaire, tous les niveaux de gouvernement, des chercheurs indépendants et des ONG environnementales. Il existe cependant un large éventail d'opinions au sein de ce groupe d'organisations et de personnes sur la gravité des incertitudes et sur la manière de les gérer, toutes les combinaisons possibles étant apparemment présentes. Cela est particulièrement évident lorsque l'on compare les résultats des évaluations menées par le Tribunal foncier et de l'environnement (MMD) et par l'Autorité suédoise de sûreté radiologique (SSM). Les principaux résultats de leurs évaluations sont donnés ci-dessous, suivis d'une brève comparaison des deux.

### RÉSULTAT DE L'EXAMEN RÉALISÉ PAR L'AUTORITÉ SUÉDOISE DE SÛRETÉ RADIOLOGIQUE (SSM) :

Dans son communiqué daté du 23 janvier 2018, la SSM a fait savoir au gouvernement qu'elle approuvait la demande de SKB à condition que certaines conditions soient remplies. On trouvera ci-après trois citations tirées de sa déclaration (soulignement//emphase ajouté).

## CONDITIONS PRÉALABLES À LA RECOMMANDATION DE SSM

La SSM recommande l'approbation des demandes d'autorisation **sous réserve de la condition préalable que SKB s'assure que les rapports préliminaires d'analyse de la sûreté (F-PSAR) ainsi que les systèmes de gestion des installations soient développés** conformément à la procédure établie pour un processus d'obtention graduelle des autorisations dans la Loi sur les activités nucléaires<sup>33</sup>.

**SKB peut commencer la construction de l'installation uniquement après l'examen et l'approbation par la SSM d'un Rapport d'analyse de la sûreté avant la construction (PSAR)**<sup>34</sup>.

Les rapports de sûreté préliminaires de SKB pour l'usine d'encapsulation et le stockage final, préalables à la décision du gouvernement sur une autorisation en application de la Loi sur les activités nucléaires, visent principalement à justifier le choix par l'entreprise du lieu et de la méthode dans la demande d'autorisation. Concernant l'examen de la documentation de SKB sur ces questions pour l'étude de la demande d'autorisation, le SSM prend en compte le fait que **certaines informations supplémentaires sont attendues** pendant le processus d'examen par étapes, après une décision du gouvernement concernant l'autorisation et avant la décision de la SSM d'autoriser la mise en service des installations<sup>35</sup>.

En ce qui concerne spécifiquement le problème de la corrosion du cuivre, la SSM a écrit que le problème pourrait être résolu à l'avenir. On trouvera ci-après trois citations sur ce sujet tirées de sa déclaration (soulignement ajouté).

Selon la SSM, **il est possible d'obtenir** une barrière contre la corrosion acceptable avec une enveloppe en cuivre de 50 mm d'épaisseur<sup>36</sup>.

**Une phase de développement est également nécessaire** pour faire la démonstration des techniques appropriées pour la fabrication, le scellement et les essais de ces conteneurs afin que les exigences requises aient le plus de chances d'être respectées<sup>37</sup>.

**La SSM n'a pas formulé d'exigences spécifiques** relatives à la vitesse de corrosion de l'encapsulation<sup>38</sup>.

## L'EXAMEN PAR LE MMD — LA SEULE ÉVALUATION RÉALISÉE PAR UN TRIBUNAL AU NIVEAU MONDIAL

L'examen par un tribunal suédois de la demande de l'industrie nucléaire suédoise de mettre en place un système de gestion du combustible usé constitue la seule évaluation jamais effectuée par un tribunal dans le monde portant spécifiquement sur une demande de système de gestion du combustible usé<sup>39</sup>. L'examen s'appuyait sur le domaine du droit que constitue le Code de l'environnement (*Miljöbalken*), entré en vigueur en 1999 afin de mieux formuler des réglementations réparties dans une multitude d'autres lois<sup>40</sup>. Le respect du Code de l'environnement est géré par une branche spéciale du système judiciaire appelée le Tribunal foncier et de l'environnement (*Markoch miljödomstolen*) (MMD)<sup>41</sup>. Un examen par le MMD est un processus judiciaire officiel qui aboutit soit à un jugement, soit dans certaines situations particulières à une déclaration au gouvernement concernant la licéité. Pour de telles exceptions, si le gouvernement décide d'autoriser l'activité, l'affaire est renvoyée au MMD pour examiner les détails du permis et les conditions applicables. Selon le Chapitre 17, section 1 (1) du Code de l'environnement, une demande de construction d'un système de gestion du combustible usé constitue une telle exception. La responsabilité de la décision finale incombe donc au gouvernement. Les déclarations du MMD et de l'Autorité de sûreté radiologique (SSM) au sens de la Loi sur les activités nucléaires sont considérées comme des recommandations adressées au gouvernement et ne peuvent être contestées en appel devant un tribunal.

Le Tribunal foncier et de l'environnement est généralement composé d'un collège de quatre membres comprenant un juge, un conseiller technique et deux membres spéciaux possédant des compétences techniques. Dans des situations exceptionnelles, afin d'élargir l'expertise dont peut bénéficier le tribunal, deux membres supplémentaires peuvent être ajoutés. C'est ce qui s'est passé lors de la demande de construction d'un système de gestion du combustible usé, qui a été examinée par un collège de six membres, soit le nombre maximum qui peut être nommé. Ce tribunal était composé de deux juges, deux conseillers techniques des tribunaux et deux membres spéciaux.

## **RÉSULTAT DE L'EXAMEN PAR LE TRIBUNAL : PAS D'APPROBATION, SAUF SI CERTAINES CONDITIONS SONT RESPECTÉES**

Dans son communiqué daté du 23 janvier 2018 portant sur sa déclaration au gouvernement, le MMD écrit :

Le tribunal ne peut pas, sur la base de l'évaluation de sûreté actuelle, trancher sur la sûreté à long terme du site de stockage<sup>42</sup>.

L'examen par le Tribunal foncier et de l'environnement (MMD) a eu pour résultat global que la demande de l'industrie devrait être rejetée, mais certains aspects de la demande ont été jugés admissibles, par exemple l'usine d'encapsulation où les conteneurs en cuivre doivent être construits et chargés. La formulation utilisée pour le résultat global n'indique pas que l'activité devrait être interdite en raison de certaines lacunes, mais plutôt qu'elle peut être autorisée si des incertitudes spécifiques sont levées. Le Tribunal a écrit ce qui suit à la première page de sa déclaration du 23 janvier 2018, ce texte figurant également à la première page du résumé publié séparément.

### **L'activité de stockage peut être autorisée si :**

SKB fournit une documentation établissant que le site de stockage définitif respectera les exigences du Code de l'environnement à long terme, malgré certaines incertitudes qui persistent quant à la façon dont la capacité de protection du conteneur est affectée par :

- a.** La corrosion due à des réactions dans une eau sans oxygène.
- b.** La corrosion par piqûres due à la réaction avec le sulfure, y compris la contribution de « l'effet sauna » à la corrosion par piqûres.
- c.** La corrosion sous contrainte due à la réaction avec le sulfure, y compris la contribution de « l'effet sauna » à la corrosion sous contrainte.
- d.** La fragilisation due à l'hydrogène.
- e.** L'impact du rayonnement radioactif sur la corrosion perforante, la corrosion sous contrainte et la fragilisation par l'hydrogène.

La responsabilité à long terme du stockage final en fonction du Code de l'environnement a été clarifiée<sup>43</sup>.

En ce qui concerne les diverses incertitudes, on trouvera ci-après d'autres citations de la déclaration du Tribunal.

## **RESPONSABILITÉ À LONG TERME**

Selon la demande de SKB, sa responsabilité prend fin au bout de quelques décennies, lorsque l'installation est définitivement scellée. Le Tribunal s'est toutefois clairement opposé à l'approche de l'abandon par l'industrie. Le Tribunal foncier et de l'environnement estime que le stockage final des déchets nucléaires est une activité qui se poursuivra même après le scellement définitif du stockage final. Selon le Code de l'environnement, **le titulaire de l'autorisation assume une responsabilité de l'activité jusqu'à nouvel ordre, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de limite de délai.** [...] La municipalité d'Östhammar refuse de prendre la responsabilité ultime du site de stockage définitif. [...] **Il est urgent de clarifier qui assume la responsabilité à long terme en application du Code de l'environnement**<sup>44</sup>.

## **RISQUE DE CORROSION DU CUIVRE**

L'enquête a montré qu'il existait des incertitudes ou des risques quant à la façon dont certaines formes de corrosion et d'autres processus peuvent nuire à la capacité du conteneur de confiner les déchets nucléaires à long terme. **Globalement, ces incertitudes concernant le conteneur sont importantes et n'ont pas été pleinement prises en compte** dans les conclusions de l'analyse de sûreté de SKB<sup>45</sup>.

## **SÛRETÉ RADIOLOGIQUE**

SKB et la SSM ont exprimé l'opinion que les conditions relatives à la sûreté radiologique ne devraient pas être prescrites dans un permis délivré en application du Code de l'environnement. **Le Tribunal estime que les éléments de preuve présentés à ce jour ne constituent pas une base suffisante pour évaluer la question**<sup>46</sup>.

## RISQUE GLOBAL

### [...] un nouveau résultat calculé de l'ensemble de l'évaluation de la sécurité est nécessaire [...]<sup>47</sup>

#### — INCERTITUDES GLOBALES CONCERNANT LE STOCKAGE, LA SÛRETÉ RADIOLOGIQUE ET LES CONDITIONS GÉOLOGIQUES

Le Tribunal foncier et de l'environnement conclut qu'un certain nombre d'incertitudes concernant la capacité de protection du stockage restent en suspens. L'étude des problèmes de sûreté radiologique à ce jour montre que les effets de l'activité ne peuvent être prédits avec suffisamment de certitude pour permettre la formulation de conditions définitives. Il peut donc être nécessaire de prévoir une période d'essai pour une évaluation en fonction du Code de l'environnement. Cependant, des investigations et des délibérations plus poussées sont nécessaires. **Le Tribunal souligne toutefois que l'étude de la formation du substrat rocheux à Forsmark, par exemple, laisse subsister des ambiguïtés pouvant justifier une période probatoire** d'évaluation pour la détermination des conditions du respect des distances ou d'autres mesures de précaution<sup>48</sup>.

#### — INTRUSION INVOLONTAIRE OU VOLONTAIRE

- Le problème de la conservation des connaissances à long terme devra être résolu au plus tard lorsque le site de stockage sera définitivement scellé, soit dans environ 70 ans<sup>49</sup>.
- Comparaison des déclarations faites au gouvernement par la SSM et le MMD.
- La SSM a répondu par l'affirmative sous réserve que certaines conditions soient remplies et le MMD par la négative, à moins que certaines conditions ne soient remplies. La tradition juridique suivie par le MMD ne permet pas de donner une approbation si des événements futurs conduisent finalement à la conformité. MMD a déclaré à ce sujet :

Lors de l'évaluation de la sûreté à long terme du stockage final, il n'est pas possible de prendre en compte les activités de recherche et développement à entreprendre après une décision de licéité<sup>50</sup>.

• Bien que la SSM et le MMD aient utilisé des formulations différentes, pour SKB, dans certains domaines essentiels, le résultat est identique dans la pratique. Aussi bien la SSM que le MMD estiment qu'il est très important d'améliorer l'analyse globale de la sûreté et la résolution du problème de la corrosion du cuivre. À l'heure actuelle, tant pour la SSM que pour le MMD, les incertitudes entourant la corrosion du cuivre sont si grandes que le projet ne devrait être mis en œuvre que si les incertitudes sont résolues. En outre, il est de la plus haute importance que la SSM et le MMD aient recommandé au gouvernement de ne pas autoriser actuellement SKB à commencer la construction d'une quelconque partie du système faisant l'objet de la demande.

#### — DÉCHETS NUCLÉAIRES DE FAIBLE ET MOYENNE ACTIVITÉ

Il existe actuellement une installation opérationnelle pour l'entreposage des déchets nucléaires de faible et moyenne activité, détenue et exploitée par l'industrie nucléaire suédoise. Cette installation appelée SFR<sup>51</sup> se situe à Forsmark, dans la municipalité d'Östhammar, à environ 145 km au nord de Stockholm. Le SFR a débuté ses activités en 1988. Cette installation est située dans la roche, à une profondeur allant de 50 à 140 mètres sous la mer Baltique et comprend quatre cavités d'une longueur de 160 mètres et un compartiment avec un silo de 50 mètres de profondeur. L'installation est reliée à la surface par deux tunnels parallèles longs d'un kilomètre. Le SFR a une capacité de 63 000 mètres cubes de déchets, dont environ 60 % a été utilisée à ce jour. Des infiltrations d'eau ont continuellement lieu dans l'installation, qui fait l'objet d'un pompage permanent. La fermeture de l'installation implique la fermeture des pompes, ce qui amènera le site à être envahi par l'eau. Il pèse une incertitude majeure sur le taux de contamination radioactive de la mer Baltique qui en résultera. Une procédure juridique est en cours pour ajouter une installation supplémentaire destinée aux déchets de faible et moyenne activité directement à côté de celle qui est actuellement en exploitation. La nouvelle installation proposée est deux fois plus grande que l'actuelle. Il est aussi proposé de la créer sous la mer Baltique, mais à une profondeur de 120 à 140 m sous la surface. Cette nouvelle installation est soumise au processus de prise de décision décrit ci-dessus pour la gestion du combustible usé. SKB a estimé que si toutes les autorisations requises étaient reçues, la construction pourrait commencer en 2020 et durer environ six ans<sup>52</sup>.

## FINLANDE — APERÇU DE LA SITUATION ACTUELLE

Il existe deux centrales nucléaires en Finlande, Olkiluoto et Loviisa. À Loviisa, deux réacteurs sont en exploitation. À Olkiluoto, deux réacteurs sont en exploitation et un en construction<sup>53</sup>. Un quatrième a reçu un permis de construire du gouvernement, mais les travaux n'ont pas encore commencé. Celui qui est en construction a été confronté à d'énormes problèmes économiques au point qu'il reste à voir s'il sera achevé un jour<sup>54</sup>. Selon Posiva, à la fin de l'année 2017, 2 200 tonnes de combustible irradié au total avaient été produites par Olkiluoto et Loviisa<sup>55</sup>.

En 2011, Posiva a présenté sa demande de construction d'une installation KBS-3 à l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (STUK) et a reçu l'autorisation de la STUK et du gouvernement en 2015<sup>56</sup>. Aucune procédure juridique n'a été effectuée. L'installation, appelée « Onkalo », a une capacité de stockage d'environ 6 500 tonnes de combustible irradié mais elle peut être agrandie. Des puits et des tunnels ont été creusés jusqu'à la profondeur prévue d'environ 470 mètres. La phase actuellement en cours porte sur un essai de stockage. Aucune installation d'encapsulation n'a été construite pour le moment<sup>57</sup>. L'installation devait initialement être terminée en 2020<sup>58</sup>, mais cette date est maintenant reportée à 2023<sup>59</sup>.

La raison de la rapidité à laquelle une installation est construite en Finlande par comparaison à ce qui se passe en Suède, est qu'en l'année 2000 le gouvernement a pris la décision de principe d'utiliser la méthode KBS-3 et de choisir le site d'Onkalo, situé à côté de la centrale électronucléaire d'Olkiluoto.

Les problèmes techniques évoqués ci-dessus dans la description de l'installation KBS-3 en Suède s'appliquent également à l'installation déjà en construction en Finlande. En outre, la Finlande s'appuie sur l'évaluation du problème de la corrosion du cuivre en Suède, plutôt que de mener ses propres recherches. Les conditions géologiques sont globalement similaires. La profondeur de l'installation est la même, et donc la recherche en Finlande notée plus haut, qui indiquait que la profondeur pourrait ne pas être suffisante pour résister au pergélisol à la prochaine période glaciaire, s'applique également à la Suède<sup>60</sup>.

En ce qui concerne les coûts, le département de l'Énergie du ministère finlandais de l'Emploi et de l'Économie a estimé en juillet 2015 à 6,5 milliards d'euros le total des coûts futurs jusqu'au moment de la fermeture de toutes les installations de traitement de tous les déchets nucléaires provenant de réacteurs nucléaires. Sur ce total, 3,5 milliards d'euros seraient consacrés au combustible usé<sup>61</sup>.

• **KBS-3** : troisième version du projet « *KärnbränsleSäkerhet* » (« Sûreté du combustible nucléaire ») de 1976 créé par la société suédoise Nuclear Fuel Supply Co.

• **MMD** : *Mark-och miljödomstolen* (Tribunal foncier et de l'environnement)

• **SKB** : *Svensk kärnbränsleförsörjning AB* (Société suédoise de gestion des déchets et des combustibles nucléaires)

• **SSM** : *Strålsäkerhetsmyndigheten* (Autorité suédoise de sûreté radiologique), l'organisme de réglementation chargé des questions de rayonnements ionisants

### Pour plus d'informations publiées par les ONG environnementales de Suède

- Le Bureau suédois des ONG pour l'évaluation sur les déchets nucléaires (MKG) : [www.mkg.se/en](http://www.mkg.se/en)
- Le Secrétariat Déchets nucléaires du mouvement environnemental suédois (Milkas) : [www.milkas.se](http://www.milkas.se) and [www.nonuclear.se/en/kbs3](http://www.nonuclear.se/en/kbs3)

- 1 Jonter, T. 2002. « Nuclear Weapon Research in Sweden. The Co-operation Between Civilian and Military Research, 1947-1972. » SKI Report 02:18. 82 pp. Disponible en PDF (533 KB) at (10 juillet 2018) : <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/publications/reports/non-proliferation/2002/200218/>
- 2 IAEA. Non daté. « Système d'information sur les réacteurs de puissance (PRIS), Suède. » Disponible à l'adresse (5 octobre 2018) : <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=SE>.
- 3 Lindström Marianne, Åhäll Karl-Inge, Holmstrand Olov, Helander Björn, Goldstick Miles.1998-06. « Nuclear Waste in Sweden - The Problem Is Not Solved ! » Disponible à l'adresse (5 octobre 2018) : <http://www.nonuclear.se/nuclear-waste-in-sweden1988>. Lien direct vers la section consacrée au référendum de 1980 : <http://www.nonuclear.se/nuclear-waste-in-sweden1988#nwchap4>.
- 4 Karlsson, Lasse. 2016-07-05. « Historien om avvecklingen som inte blivit av. Aktualiserad juni 2016. Framställt för Folkkampanjen mot Kärnkraft-Kärnvapen. » (« L'histoire de la sortie du nucléaire qui n'est jamais arrivée. Mis à jour en juin 2016. Préparé pour le mouvement anti-nucléaire suédois. ») (En suédois uniquement.) Disponible à l'adresse (5 octobre 2018) : <http://www.nonuclear.se/historien-om-avvecklingen-lasse-karlsson>.
- 5 Bureaux du gouvernement de la Suède. 16 juin 2016. « Accord-cadre entre le Parti social-démocrate suédois, le parti des Modérés, le Parti vert suédois, le Parti du centre et les Démocrates chrétiens. » Disponible à l'adresse (5 octobre 2018) : <https://www.government.se/49d8c1/contentassets/8239ed8e9517442580aac9bcb00197cc/ek-ok-eng.pdf>.
- 6 SKB. 2017-09-21. « Organisation. » Site web de SKB (10 juillet 2018) : <http://www.skb.com/about-skb/organisation/>
- 7 Vattenfall. 2015-10-22. « Ownership. » Site web de Vattenfall (10 juillet 2018) : <https://corporate.vattenfall.com/investors/key-facts/ownership/>
- 8 SKB. 2017-04. « Plan 2016. Costs from and including 2018 for the radioactive residual products from nuclear power. Basis for fees and guarantees for the period 2018-2020. » Technical Report TR-17.02. 52 pp. Voir p. 35. Consulté le 5 octobre 2018 sur : <https://www.skb.se/publikation/2487964/TR-17-02.pdf>. Une partie du combustible utilisé provenant des réacteurs de recherche est incluse dans la demande pour KBS-3 mais n'est pas incluse dans la quantité estimée en tonnes, bien qu'elle soit intégrée dans l'estimation du nombre de conteneurs.
- 9 Ibid. Voir pp 37-38.
- 10 The Nuclear Waste Fund. 2015-10-22. « Facts about the Nuclear Waste Fund 2017 ». 20 pp. Consulté le 5 octobre 2018 : <http://www.karnavfallsfonden.se/informationinenglish/annualreport.4.4945b3d81223a8cbbf8800024168.html>. Lien direct (consulté le 5 octobre 2018) : <http://www.karnavfallsfonden.se/download/18.46d462c3159fb761aca1f4f/1523619691724/Fakta+om+K%C3%A4rnavfallsfonden+2017+engelska.pdf> (276 kB).11 Ibid. Voir p. 2.
- 12 Op. cit., note 8. Voir p. 39.
- 13 SKB. 2016-09. « Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. » Technical Report TR-16-15. 314 pp. Consulté le 5 octobre 2018. <https://www.skb.se/publikation/2485289/>. Les données financières sont présentées dans un document séparé, dont le « Plan 2016 » mentionné ci-dessus constitue le volume correspondant pour 2016.
- 14 Voir par exemple la décision du gouvernement sur les rapports de 1995 et 1998, dont les références sont données ci-après. [1995] Miljödepartementet. 1996-12-19. « Regeringens beslut. Program för forskning m.m. angående kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring. » En suédois seulement. 6 pp. Voir p. 3. [1998] Miljödepartementet. 2001-11-01. « Regeringens beslut. Komplettering av program för forskning, utveckling och demonstration för kärnavfallets behandling och slutförvaring, Fud-program 98. » En suédois seulement. 8 pp. Voir p. 1.
- 15 Une grande partie de la demande d'autorisation est consultable en anglais sur le site web de SKB, (5 octobre 2018) : <http://www.skb.com/future-projects/the-spent-fuel-repository/our-applications>
- 16 Voir par ex. : Chatzis, Irena (Département de l'énergie nucléaire de l'IAEA). 5 janvier 2018. « Solving the Back End : Finland's Key to the Final Disposal of Spent Nuclear Fuel. » Consulté le 5 octobre 2018 sur : <https://www.iaea.org/newscenter/news/solving-the-back-end-finlands-key-to-the-final-disposal-of-spent-nuclear-fuel#infobox>.
- 17 Kamp, Kevin. 2010-11-16. « Statement of Kevin Kamps, Beyond Nuclear to Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, November 16, 2010, Washington, D.C. » Consulté le 5 octobre 2018 sur : <http://www.nonuclear.se/KevinKampBRC20101116>.
- 18 Mörner, Nils-Axel. 2013. « Dry Rock Deposit - an alternative of handling the high level nuclear waste - the DRD method - a short presentation. » 30 pp. Consulté le 5 octobre 2018 : [http://www.nonuclear.se/drd\\_method2013morner](http://www.nonuclear.se/drd_method2013morner).

- 
- 19 SKB. 2016-11-02. « Our method of final disposal. » Consulté le 5 octobre 2018 sur : <http://www.skb.com/future-projects/the-spent-fuel-repository/our-methodology/>. Le « 3 » de « KBS-3 » est parfois interprété comme une référence aux trois barrières alors que ce n'était pas la signification initiale.
- 20 Op. cit., note 8. Voir p. 36.
- 21 SKB. 2010-12. « Design, production and initial state of the canister. » Technical Report TR-10-14. Voir p. 28 pour le poids et pp. 33-34 pour les dimensions. Consulté le 10 juillet 2018 : <http://skb.se/upload/publications/pdf/TR-10-14.pdf> (3,8 MB).
- 22 SKB aborde par exemple la question de la profondeur du permafrost à la page 200 de son document de demande d'autorisation de mars 2011 : « Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. Volume I. Technical Report TR-11-01. » Une étude réalisée en 2015 par des spécialistes de l'Université de Turku, en Finlande, a révélé que le permafrost pourrait, au cours de la prochaine période glaciaire, atteindre la profondeur du stockage prévu en Finlande et en Suède. Référence pour le rapport : Räsänen, Matti E. ; Huitti, Janne V. ; Bhattarai, Saroj ; Harvey Jerry III ; Huttunen, Sanna. 2015. « The SE sector of the Middle Weichselian Eurasian Ice Sheet was much smaller than assumed. » *Quaternary Science Reviews* 122 (2015) 131e141. Tous les auteurs sont de l'Université de Turku, en Finlande. Consulté le 5 octobre 2018 : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0277379115002243>.
- 23 Swedish Environmental Movement's Nuclear Waste Secretariat (Milkas). 2006-12. « The Baltic Sea is Radioactive. » 4 pp. Consulté le 5 octobre 2018 : <http://www.nonuclear.se/baltic-radioactive200612.html>.
- 24 Copper Development Association Inc. Décembre 1998. « Copper's Role in the Safe Disposal of Radioactive Waste: Copper's Relevant Properties - Part I. » Consulté le 5 octobre 2018 : <https://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/1998/12/nuclear.html>; and Source: Hultquist, G. B., Szakálos, P., Graham, M. J., Sproule, G. I., & Wikmark, G. 2008. Detection of hydrogen in corrosion of copper in pure water. In *Int. Corros. Congr.: Corros. Control Serv. Soc.* (pp. 2378-2386). Consulté le 5 octobre 2018 sur : [https://www.researchgate.net/publication/238102363\\_Detection\\_of\\_hydrogen\\_in\\_corrosion\\_of\\_copper\\_in\\_pure\\_water](https://www.researchgate.net/publication/238102363_Detection_of_hydrogen_in_corrosion_of_copper_in_pure_water) (PDF 2,5 MB).
- 25 Macdonald Digby D.; Sharifi -Asl, Samin; Engelhard, George R.; Urquidi-Macdonald, Mirna. « Issues in the corrosion of copper in a Swedish high level nuclear waste repository. » 2012. Swedish Radiation Safety Authority (SSM) Report number 2012:11. 160 pp. Consulté le 5 October 2018 : <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/publications/reports/waste-shipments-physical-protection/2012/201211/>.
- 26 En ce qui concerne la présence ou l'absence d'oxygène, voir : He, Xihua & M. Ahn, Tae & Gwo, Jin-Ping. 2017. Corrosion of Copper as a Nuclear Waste Container Material in Simulated Anoxic Granitic Groundwater. *CORROSION*. 74. 10.5006/2471.
- 27 Szakálos Peter, Leygraf Christofer, Rosengren Anders, Seetharaman Seshadri, Grinder Olle, Linder Jan. 2018-04-26. « Analys av kärnbränsleförvarsfrågan efter mark-och miljödostolens yttrande till regeringen. » (« Analyse de la question de la gestion du combustible nucléaire après la déclaration au gouvernement du Tribunal foncier et de l'environnement. ») En suédois seulement. 4 pp. Consulté le 5 octobre 2018 : <http://www.nonuclear.se/szakalos-et-al20180426analys-av-karnbransleförvarsfragan>. Ce document a été transmis au gouvernement pour l'examen en cours, et le gouvernement a demandé à SKB de formuler ses commentaires avant le 30 avril 2019. Parmi les auteurs figure un groupe de spécialistes de l'Institut royal de technologie (KTH) de Stockholm, à la pointe de la recherche sur la corrosion du cuivre au niveau mondial, et un ancien collaborateur de la SSM. Les recherches menées en Suède sur la corrosion du cuivre par des spécialistes indépendants ont été dirigées par le professeur associé du KTH, Gunnar Hultquist, décédé en février 2016. En 1986, il a démarré une expérience qui montrait que le cuivre se corrodait dans une eau sans oxygène. Ses résultats ont finalement été confirmés au niveau international par des méthodes indépendantes.
- 28 Ibid.
- 29 Statskontoret. 2008-04-17. Samråd, stöd och slutförvar – en utvärdering av stöd till ideella organisationer ur Kärnavfallsfonden. 104 pp. En suédois seulement. Consulté le 5 octobre 2018 sur : <http://www.nonuclear.se/statskontoret20080417.html>.
- 30 Reuters. 2018-01-23. « Swedish regulators disagree on safety of nuclear waste plan. » Consulté le 5 octobre 2018 sur : <https://uk.reuters.com/article/us-sweden-nuclear-regulator/swedish-regulators-disagree-on-safety-of-nuclear-waste-plan-idUKKBN1FC21P>.
- 31 SVT Nyheter (Actualités télévisées suédoises). 2018-01-25. « Miljöjurister om slutförvaret: Osäkerhet bör leda till ett nej. » (« Commentaire des juristes de l'environnement sur le stockage final: l'incertitude devrait conduire à un non. ») En suédois uniquement. Consulté le 5 octobre 2018 sur : <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/upsala/miljojuristen-regeringen-borde-saga-nej>.
- 32 Cette citation provient du site web du Conseil. Consulté le 5 octobre 2018 sur : <http://www.karnavfallsradet.se/en>. Les rapports annuels sont disponibles en suédois et en anglais sur le site web du Conseil. Pour le rapport de 2018, voir : <http://www.karnavfallsradet.se/en/nuclear-waste-state-of-the-art-report-2018-decision-making-in-the-face-of-uncertainty>. Lien direct (consulté le 10 juillet 2018) (1,1 MB) : [http://www.karnavfallsradet.se/sites/default/files/documents/sou\\_2018\\_8\\_eng\\_webb.pdf](http://www.karnavfallsradet.se/sites/default/files/documents/sou_2018_8_eng_webb.pdf).

- 33 SSM. 2018-01-23. « Pronouncement on licence applications for permission to develop facilities for final management of spent nuclear fuel - Statement of the Swedish Radiation Safety Authority. » 5 pp. Voir p. 2. Réf. n° : SSM2011-1135 et SSM2015-279. N° du document : SSM2011-1135-23. Consulté le 5 octobre 2018 sur : <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/areas/radioactive-waste/spent-nuclear-fuel-repository/final-repository-for-spent-nuclear-fuel/our-review-process/pronouncement-on-repository-applications/>. Lien direct vers le fichier PDF (364 KB) (5 octobre 2018) : <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/078506f952ae4357847628edcc1785a4/pronouncement-on-licence-applications-for-permission-to-develop-facilities-for-final-management-of-spent-nuclear-fuel-statement-of-the-swedish-radiation-safety-authority>. Original suédois : SSM. 2018-01-23. « Yttrande över ansökningar om tillstånd till anläggningar för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle. » 4 pp. Voir p. 2. Diarién : SSM2011-1135 et SSM2015-279. Dokument nr : SSM2011-1135-23. Consulté le 5 octobre 2018 : <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/radioaktivt-avfall/slutförvar/slutförvar-for-anvant-karnbransle/stralsakerhetsmyndighetens-granskning-av-ansokan/slutförvarsyttrande-till-regeringen/>. Lien direct vers le fichier PDF (5 octobre 2018) (345 KB) : <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/b99c23f76a044b57b76174051b587407/ssm2011-1135-23-yttrande-over-ansokningar-om-tillstand-till-anlaggningar-for-slutligt-omhändertagande-av-anvant-karnbransle.pdf>.
- 34 Ibid. Voir p. 3.
- 35 SSM. 2018-01-23. « 2018:02. Sammanfattning. Beredning inför regeringens prövning Slutförvaring av använt kärnbränsle. » En suédois seulement. Traduction non officielle. 102 pp. Voir p. 10. N° de rapport 2018:02 ISSN 2000-0456. Consulté le 5 octobre 2018 : <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/radioaktivt-avfall/slutförvar/slutförvar-for-anvant-karnbransle/stralsakerhetsmyndighetens-granskning-av-ansokan/slutförvarsyttrande-till-regeringen/>. Lien direct vers le fichier PDF (consulté le 10 juillet 2018) (2,3 MB) : <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/96342ee1d37e4111b032be88ccb158bf/201802-sammanfattning>.
- 36 Ibid. Voir p. 66.
- 37 SSM. 2018-01-23. « 2018:03. Remissammanställning. Beredning inför regeringens prövning Slutförvaring av använt kärnbränsle. » En suédois seulement. Traduction non officielle. 142 pp. Voir p. 48. N° de rapport 2018:03 ISSN 2000-0456. Consulté le 5 octobre 2018 : <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/radioaktivt-avfall/slutförvar/slutförvar-for-anvant-karnbransle/stralsakerhetsmyndighetens-granskning-av-ansokan/slutförvarsyttrande-till-regeringen/>. Lien direct vers le fichier PDF (consulté le 10 juillet 2018) (2,6 MB) : <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/a3ade3d30e7944038eed5dc33ef8edf/201803-remissammanstallning>.
- 38 Ibid. Voir p. 98.
- 39 Des procédures judiciaires ont toutefois été engagées dans lesquelles la gestion du combustible usé, au sens général du terme, faisait partie de l'affaire. Deux exemples sont données par des actions juridiques engagées par Greenpeace : le rejet en 1995 par la Cour suprême de la construction d'une usine de retraitement à Zheleznogorsk dans le territoire de Krasnoyarsk en Russie et la décision de la Haute Cour de justice du Royaume-Uni en 2007 qui a estimé qu'un processus de consultation « trompeur » et « présentant de graves irrégularités » avait été mené par le gouvernement pour la construction de nouvelles centrales nucléaires. Un rapport de 1993 de l'AIEA intitulé « Nuclear Energy Enquiries - National and International » (« Enquêtes sur l'énergie nucléaire à un échelon national et international ») documente plus de 30 enquêtes de natures très diverses ([http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/25/026/25026317.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/25/026/25026317.pdf)). Au Canada, en 1997, s'est conclue une évaluation environnementale fédérale de 10 ans sur le concept de stockage géologique prévu par EACL. Aucun site n'a été choisi et la conclusion était qu'il restait de nombreuses questions en suspens sur le système et qu'il n'était donc pas prêt à être mis en œuvre (voir par exemple : [www.ccnr.org/fearo\\_hlw.html](http://www.ccnr.org/fearo_hlw.html) et [www.ccnr.org/hlw\\_fearo\\_summary.html](http://www.ccnr.org/hlw_fearo_summary.html)). Au Canada également, un rapport de 1980 sur la gestion des déchets nucléaires a été publié après 15 semaines d'auditions par le Comité spécial du Parlement sur les affaires d'Ontario Hydro. La Commission californienne pour la conservation et le développement de l'énergie, dirigée par Emilio Varanini III, a organisé une série d'auditions dans les années 70 sur la question de savoir s'il existait ou non une méthode sûre pour l'élimination du combustible usé, et elle a conclu qu'il n'en existait pas à l'époque actuelle, et a également déclaré qu'une telle méthode pourrait bien ne jamais exister. Dans une interview, Emilio Varanini III a déclaré que la croyance en une élimination sûre des déchets nucléaires reposait non pas tant sur des preuves scientifiques que sur une « euphorie technique ». Le rapport a eu des conséquences législatives, dans la mesure où le législateur californien avait précédemment adopté une loi interdisant tout nouveau réacteur en Californie s'il ne pouvait pas être prouvé qu'il existait une méthode sûre d'élimination des déchets. Le Législateur a donc demandé à la Commission de déterminer si tel était ou non le cas. Le législateur a accepté l'avis de la Commission et aucun nouveau réacteur n'a été autorisé en Californie.
- 40 Bureaux du gouvernement de la Suède. 1999. « The Swedish Environmental Code, Ds 2000:61. » 164 pp. Consulté le 5 octobre 2018 : <https://www.government.se/legal-documents/2000/08/ds-200061/>. Lien direct (consulté le 10 juillet 2018) (<https://www.government.se/49b73c/contentassets/be5e4d4ebdb4499f8d6365720ae68724/the-swedish-environmental-code-ds-200061>) (PDF 559 kB). Cette version anglaise n'inclut pas les révisions entrées en vigueur le 1er août 2018, qui ont modifié la clause relative aux activités nucléaires.
- 41 Voir le site web des Tribunaux suédois, par exemple (10 juillet 2018) : <http://www.domstol.se/Funktioner/English/The-Swedish-courts/District-court/Land-and-Environment-Courts/>
- 42 Mark- och miljödomstolen, Nacka tingsrätt. 2018-01-23. « Mark- och miljödomstolen lämnar sitt yttrande till regeringen i målet om ett slutförvar för kärnavfall. » (Traduction non officielle : « Le Tribunal foncier et de l'environnement transmet au gouvernement sa déclaration dans l'affaire portant sur un site de stockage définitif pour des déchets nucléaires. ») En suédois seulement. Consulté le 5 octobre 2018 sur : <http://www.nackatingsratt.domstol.se/Om-tingsratten/Uppmarksammade-mal/Ansokan-om-slutförvar-for-anvant-karnbransle-mm/>.



- 
- 43 Nacka District Court, Land and Environmental Court. 2018-01-23. « Exposé sommaire du Tribunal foncier et de l'environnement, Affaire no. M 133-11, Dossier: Autorisation, conformément au Code de l'environnement, d'un système intégré d'élimination finale du combustible nucléaire irradié et des déchets nucléaires; faisant actuellement l'objet d'une déclaration à destination du gouvernement. » Traduction non officielle. Consulté le 5 octobre 2018 sur: <http://www.nonuclear.se/mmd20180123summary-statement-case-m1333-11spent-fuel>.
- 44 Ibid. Voir page 4.
- 45 Op. cit., note 44, voir page 4.
- 46 Op. cit., note 44, voir page 11.
- 47 Op. cit., note 44, voir page 10.
- 48 Op. cit., note 44, voir pp. 11-12.
- 49 Mark- och miljödomstolen, Nacka tingsrätt. 2018-01-23. « Yttrande, Mål nr M 1333-11, Saken: Tillstånd enligt miljöbalken till anläggningar i ett sammanhängande system för slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall; nu fråga om yttrande till regeringen. » 566 sid. Se sid. 80. En suédois seulement. Consulté le 5 octobre 2018 sur: <http://www.nackatingsratt.domstol.se/Om-tingsratten/Uppmarksammade-mal/Ansokan-om-slutforvar-for-anvant-karnbransle-mm/>.
- 50 Op. cit., note 44, voir page 6.
- 51 SKB. Non daté. « SFR - Final Repository for Short-lived Radioactive Waste. » Six pp. Consulté le 5 octobre 2018: <http://www.skb.com/our-operations/sfr/>. Lien direct pour téléchargement (5 octobre 2018): [http://skb.se/upload/publications/pdf/SFR\\_folder\\_engelsk.pdf](http://skb.se/upload/publications/pdf/SFR_folder_engelsk.pdf).
- 52 SKB. 2017-12-11. « Planned extension of the SFR. » Site web de SKB. Consulté le 5 octobre 2018 sur: <http://www.skb.com/future-projects/extending-the-sfr/>.
- 53 Posiva Oy. 2012. « Nuclear waste management of the Olkiluoto and Loviisa nuclear power plants. Summary of operations in 2012. » 58 pp. Voir p. 7. Consulté le 5 octobre 2018 sur: [http://www.posiva.fi/en/databank/publications/other\\_publications#.Wykbcop9jDA](http://www.posiva.fi/en/databank/publications/other_publications#.Wykbcop9jDA). Adresse directe: [http://www.posiva.fi/files/3197/YJH\\_2012\\_Eng\\_Low.pdf](http://www.posiva.fi/files/3197/YJH_2012_Eng_Low.pdf) (3,87 MB).
- 54 World Nuclear News. 2018-03-12. « Olkiluoto 3 EPR parties agree settlement. » Consulté le 5 octobre 2018: <http://www.world-nuclear-news.org/C-Olkiluoto-3-EPR-parties-agree-settlement-12031801.html>
- 55 Posiva. 2018-04-30. « Annual Report 2017. » 44 pp. Voir p. 3. Consulté le 5 octobre 2018 sur: [http://www.posiva.fi/en/databank/publications/annual\\_reports#.WykX3Ip9jDA](http://www.posiva.fi/en/databank/publications/annual_reports#.WykX3Ip9jDA).
- 56 Ibid. Voir p. 3.
- 57 Posiva. 2017-03-05. « Annual Report 2016. » 44 pp. Voir p. 5. Consulté le 5 octobre 2018 sur: [http://www.posiva.fi/en/databank/publications/annual\\_reports#.WykX3Ip9jDA](http://www.posiva.fi/en/databank/publications/annual_reports#.WykX3Ip9jDA).
- 58 Posiva. 2006-03-29. « Onkalo, Underground Rock Characterisation Facility at Olkiluoto, Finland. » 8 pp. Voir p. 2.
- 59 World Nuclear News. 2018-06-20. « Full-scale tests to start soon at Finnish repository. » Consulté le 5 octobre 2018 sur: <http://www.world-nuclear-news.org/WR-Full-scale-tests-to-start-soon-at-Finnish-repository-2006185.html>.
- 60 Op. cit., note 23.
- 61 Ministère finlandais de l'emploi et de l'économie, Département de l'énergie. Juillet 2015 « Management of spent fuel and radioactive waste in Finland – national programme in accordance with Article 12 of the Council Directive 2011/70/Euratom. » 31 pp. Voir p. 26. Consulté le 5 octobre 2018 sur: <https://www.stuk.fi/documents/12547/554501/National+Programme+072015docx+14072015+English+translation+21082015.pdf/b435b514-53e2-4dc2-8999-99cc91b4a886>.

6

**ROYAUME-UNI**

# LA POLITIQUE DE « STOCKAGE » DES DÉCHETS RADIOACTIFS AU ROYAUME-UNI

**Pete  
Roche**

**La publication de deux nouveaux documents de consultation en janvier 2018 a marqué le début de la sixième tentative du gouvernement britannique en 42 ans de trouver une collectivité disposée à accueillir un site de stockage de déchets radioactifs<sup>1</sup>. N'ayant pas réussi à trouver un site d'enfouissement des déchets nucléaires dans les années 70, 80 et 90, le gouvernement a décidé d'essayer une nouvelle approche fondée sur ce qu'il a appelé le « volontariat et le partenariat ». L'expérience acquise par le passé avait en effet amené le gouvernement et l'industrie nucléaire à comprendre qu'ils ne pourraient pas imposer une installation de déchets nucléaires sans le consentement de la communauté, toutefois tous deux continuent d'insister en affirmant que le stockage géologique est la seule voie à suivre<sup>2</sup>.**

En 2003, le gouvernement britannique a mis en place un nouveau comité indépendant – le Comité sur la gestion des déchets radioactifs (CoRWM) – chargé d'examiner les options de gestion des déchets radioactifs et de formuler des recommandations. Trois ans plus tard, le comité a formulé une série de recommandations. Bien qu'il ait mis en avant le stockage géologique comme la meilleure option disponible pour les déchets existants et les déchets prévus, de nombreuses mises en garde et d'autres recommandations importantes ont été ignorées par le gouvernement. Le Comité estime par exemple : «[...] les incertitudes entourant la mise en œuvre du stockage géologique [...] ont conduit le CoRWM à recommander la poursuite d'un engagement en faveur d'une gestion sûre des déchets<sup>3</sup>.

Le professeur Andy Blowers, ancien membre du CoRWM, explique : «*Le stockage en profondeur pourrait être la solution à long terme, mais faire la démonstration de la sûreté, trouver un site géologique approprié et une communauté consentante constituent des défis difficiles à relever qui prendront probablement beaucoup de temps. La recherche d'un site de stockage détourne l'attention de la solution réelle pour un avenir prévisible, qui consiste à assurer la gestion sûre et sécurisée des déchets existants qui doivent inévitablement être gérés<sup>4</sup>.*»

Le 30 janvier 2013, le Conseil du comté de Cumbria, dans le nord-ouest de l'Angleterre (où se trouvent à la fois l'installation de retraitement de Sellafield et le parc national du Lake District) a rejeté les plans du gouvernement visant à entreprendre des travaux préliminaires pour un site d'enfouissement de déchets radioactifs. Le comté et ses conseils de district de l'ouest, Allerdale et Copeland, étaient les seules municipalités du Royaume-Uni participant encore à des études de faisabilité pour une installation de stockage qui devrait coûter 12 milliards de livres. Après avoir essuyé ce refus, le Royaume-Uni s'est une nouvelle fois retrouvé sans aucune perspective pour la gestion des déchets nucléaires existants, sans parler des déchets provenant des nouveaux réacteurs prévus dans son nouveau programme<sup>5</sup>.

Cette cinquième recherche d'un site souterrain pour une décharge nucléaire avait débuté en 2008. Les communautés de l'ensemble du pays ont été invitées à évoquer la possibilité d'accueillir un site qui deviendrait à terme un site de stockage géologique (*Geological Disposal Facility*). Le conseil municipal d'Allerdale, le conseil municipal de Copeland Council et le conseil du comté de Cumbria ont été les seules collectivités locales à se porter volontaires pour discuter de la possibilité de rechercher un site dans le West Cumbria. Le *Partenariat pour une gestion sûre des déchets radioactifs en West Cumbria (West Cumbria Managing Radioactive Waste Safely Partnership)* a été créé par les trois conseils «*pour veiller à ce qu'une large diversité d'intérêts de la communauté soit représentée dans les discussions<sup>6</sup>.*»

Le Partenariat s'est réuni environ toutes les six semaines pendant plus de trois ans pour examiner les problèmes qui se poseraient si le West Cumbria participait à la recherche d'un site pour construire un site de stockage de déchets radioactifs de haute activité. Le rapport final du Partenariat a été publié le 16 août 2012<sup>7</sup>. Même si aucune zone n'a été écartée en Cumbria, en dehors de celles exclues par le British Geological Survey (BGS), un géologue a identifié deux zones très sensibles qui auraient pu faire l'objet d'une étude plus approfondie. Il s'agissait d'Eskdale dans la région des Lacs du sud-ouest et de Silloth dans la zone des Lacs du nord<sup>8</sup>.

---

Lors de diverses réunions publiques en Cumbria, le professeur Stuart Haszeldine de l'Université d'Édimbourg<sup>9</sup> et le professeur émérite David Smythe de l'Université de Glasgow ont expliqué qu'il existait déjà suffisamment d'informations pour décider d'exclure d'éventuels sites à Allerdale et à Copeland. David Smythe a déclaré qu'il avait démontré que les deux groupes lithologiques trouvés autour d'Eskdale et de Silloth n'étaient pas adaptés<sup>10</sup>.

Il est intéressant de noter que Tim Knowles, qui a présidé le Partenariat pour une gestion sûre des déchets radioactifs en West Cumbria, ne soutient plus l'idée du stockage géologique des déchets nucléaires en Cumbria. Il semble être d'avis que la géologie de Cumbria n'est pas appropriée et qu'il existe de bien meilleurs sites ailleurs dans le pays. T. Knowles a suggéré qu'un entreposage sécurisé en subsurface pourrait constituer une meilleure solution et que cela pourrait se faire sous le site de Sellafield. La principale différence entre cette option et un site d'enfouissement géologique est que ces installations sont des entreposages permettant de récupérer les colis, situés généralement à environ 30 mètres sous la surface, avec une durée de vie de 100 à 200 ans et, par conséquent, les conditions géologiques sont moins importantes que pour des sites de stockage permanents en profondeur<sup>11</sup>.

## **SELLAFIELD — L'HÉRITAGE INCONTOURNABLE**

Sellafield – le site britannique de deux usines de retraitement actuellement en exploitation – est également situé en Cumbria. En 2012, un rapport du National Audit Office (NAO) a critiqué Sellafield comme présentant « *un risque important pour les personnes et l'environnement* » en raison de la détérioration des installations d'entreposage de déchets radioactifs et a appelé à une amélioration immédiate de la gestion des grands projets sur le site<sup>12</sup>.

L'absence d'avancées relevée dans le rapport de la NAO a incité la députée Margaret Hodge, présidente de la Commission des comptes publics de la Chambre des communes (PAC) à déclarer que Sellafield représentait un « *risque intolérable* »<sup>13</sup>. Ensuite, en février 2013, PAC a publié son propre rapport décrivant Sellafield comme « [...] *une accumulation extraordinaire de déchets dangereux, en grande partie stockés dans des installations nucléaires obsolètes.* »<sup>14</sup>

Plus récemment, le National Audit Office (NAO) a détaillé l'état instable des conteneurs de plutonium extrêmement dangereux de l'usine de retraitement de Sellafield, qui « *se dégradent plus rapidement que prévu* »<sup>15</sup>.

Il n'est donc pas surprenant que beaucoup de gens font valoir que la priorité devrait être « *d'assurer la gestion sûre et sécurisée des déchets existants qui doivent inévitablement être gérés.* »

Le Conseil du comté de Cumbria, par exemple, a appelé à plus de clarté sur la manière dont les déchets de haute activité, dont la majorité est actuellement stockée à Sellafield, resteront sécurisés si un lieu approprié n'est pas identifié. « *Aucune information n'est fournie sur ce qui va se passer si aucune communauté volontaire n'est trouvée dans la période de 20 ans requise pour préparer un site de stockage géologique. Il est donc essentiel de disposer d'un plan B pour l'entreposage sécurisé de ces déchets au cours de la période de 15 à 20 ans que le gouvernement estime nécessaire pour mener à terme le processus d'identification et de sélection d'un site. Les déchets sont toujours in situ et nécessitent des installations d'entreposage, près de la surface ou en surface pour la période intermédiaire, qui ne peuvent être de qualité inférieure aux normes.* »<sup>16</sup>

## **QUARANTE ANS DE RECHERCHE SE SOLDENT PAR UN ÉCHEC**

Ainsi, après plus de 60 ans de programme nucléaire civil, le Royaume-Uni cherche toujours une solution à long terme pour gérer ses déchets radioactifs de haute activité. La recherche d'un site pour construire un site d'enfouissement souterrain a démarré il y a près de 40 ans, en 1976, quand huit sites potentiels avaient été sélectionnés. Cela a suscité une opposition massive du public au stockage des déchets nucléaires, ce qui a contraint le gouvernement à abandonner le programme en décembre 1981.

Après plusieurs tentatives supplémentaires pour trouver un site de stockage, la quatrième tentative (lancée par l'agence de gestion des déchets de l'époque, Nirex) consistait à construire une « Installation de caractérisation des roches » (*Rock-Characterisation Facility*) à Sellafield. Une enquête publique d'une durée de cinq mois a eu lieu à la fin de 1995 et s'est achevée le 1<sup>er</sup> février 1996. Le 17 mars 1997, juste avant des élections législatives, le secrétaire d'État à l'Environnement de l'époque, John Gummer, a rejeté la demande de permis de construire présentée par Nirex. Aussi lorsque le

---

gouvernement Blair a publié son premier Livre blanc sur l'énergie en février 2003, ce document annonçait-il assez logiquement que le gouvernement ne ferait pas de propositions en vue de la construction de nouvelles centrales nucléaires car «il fallait résoudre d'importants problèmes relatifs aux déchets nucléaires.<sup>17</sup>»

## **UN PROGRAMME DE NOUVEAUX RÉACTEURS**

Lorsque le gouvernement Gordon Brown a publié un autre Livre blanc sur l'énergie en janvier 2008<sup>18</sup>, il avait affirmé que les progrès en matière de déchets nucléaires avaient suffisamment avancé pour justifier un changement de politique en matière de construction de nouvelles centrales nucléaires, ignorant ainsi une autre recommandation importante du CoRWM. Les recommandations du CoRWM 2006 faisaient en effet observer que «*les problèmes politiques et éthiques posés par la création de déchets supplémentaires sont assez différents de ceux relatifs aux déchets déjà engagés - et donc inévitables.*» Par la suite, le Comité a précisé: «*(...) une solution qui est éthiquement acceptable pour traiter les combustibles usés existants n'est pas nécessairement une solution éthiquement acceptable pour traiter des matériaux nouveaux ou modifiés.*<sup>19</sup>»

En d'autres termes, le professeur Blowers dit: «*Il est pervers d'aggraver le problème en y ajoutant un programme de construction de nouvelles centrales, qui entraînera une augmentation considérable de la radioactivité provenant du combustible usé et d'autres déchets hautement radioactifs qui devront être entreposés indéfiniment sur des sites vulnérables dispersés sur nos côtes.*<sup>20</sup>»

## **DÉCHETS LIÉS AUX NOUVEAUX RÉACTEURS**

Contrairement au combustible usé des réacteurs britanniques existants, généralement acheminé par train à Sellafield, dans le comté de Cumbria, pour y être retraité, le gouvernement n'envisage pas de gérer de la même manière le combustible usé provenant des nouveaux réacteurs tels que celui d'Hinkley Point. En fait, l'usine de retraitement des combustibles oxydes (THORP) à Sellafield, qui retraitera le combustible usé des réacteurs à refroidissement par gaz (AGRS) arrivant en fin de vie, devrait fermer d'ici 2018, et il n'est pas prévu de la remplacer.

L'entreprise publique britannique Radioactive Waste Management Ltd. indique que les nouveaux réacteurs proposés pour l'Angleterre et le Pays de Galles utiliseront du combustible à taux de combustion élevé (65 GW/tU), ce qui nécessitera une période de refroidissement pouvant aller jusqu'à 140 ans avant de pouvoir les placer dans un site de stockage souterrain. Ceci pourrait signifier que le combustible usé serait entreposé sur les sites des nouveaux réacteurs pendant une période pouvant aller jusqu'à 200 ans (soit 140 ans après la fermeture des réacteurs). Cependant, en mélangeant judicieusement le combustible usé exigeant une longue durée de refroidissement et celui pour lequel un refroidissement plus court est suffisant, il est possible de réduire à environ 60 ans avant stockage la durée de l'entreposage après la fin de l'exploitation de la centrale (ce qui ferait un entreposage pendant 120 ans)<sup>21</sup>. Dans tous les cas, aucune installation de stockage géologique (GDF) ne devrait être prête à recevoir les déchets avant 2040 au moins. Les déchets des nouveaux réacteurs, tels que Hinkley Point C, ne devraient pas être mis dans l'installation de stockage géologique avant la mise en place de tous les déchets existants, ce qui devrait prendre environ 90 ans, soit jusqu'à environ 2130. Le combustible irradié provenant des nouveaux réacteurs proposés au Royaume-Uni pourrait donc rester sur le site pendant au moins 120 ans.

L'industrie nucléaire et le gouvernement affirment régulièrement que le volume de déchets nucléaires produit par les nouveaux réacteurs sera limité, qu'il correspondra à environ 10% du volume de déchets existants. Ils laissent entendre que ce volume supplémentaire ne fera pas une différence significative dans la recherche d'un site de stockage souterrain pour les déchets que l'industrie nucléaire britannique a déjà créés<sup>22</sup>. L'utilisation du volume pour mesurer l'impact des déchets radioactifs est cependant très trompeuse. Le volume n'est pas la meilleure mesure à utiliser pour évaluer l'impact probable des déchets et du combustible usé provenant d'un nouveau programme de réacteurs, en termes de gestion et de stockage.

Le «combustible à taux de combustion élevé» qui devrait être utilisé par Hinkley Point C sera beaucoup plus radioactif que le combustible usé produit par les réacteurs existants. Ainsi, plutôt que d'utiliser le volume comme critère, la quantité de radioactivité dans les déchets, qui détermine l'espace nécessaire à un stockage en couches géologiques profondes, constitue un moyen plus approprié de mesurer l'impact des déchets nucléaires produits par les nouveaux réacteurs.

Selon Radioactive Waste Management Ltd, la radioactivité provenant des déchets existants (c'est-à-dire sans inclure les nouveaux réacteurs) devrait être de 4 770 000 térabecquerels (TBq) en 2200. La radioactivité du seul combustible usé (à l'exclusion des autres types de déchets) générée par un programme de 16 GW de nouveaux réacteurs devrait être d'environ 19 000 000 TBq. Hinkley Point C serait une centrale de 3,2 GW, de sorte que la quantité de radioactivité contenue dans le seul combustible usé de Hinkley Point C en 2200 serait de 3 800 000 TBq, soit environ 80 % de la radioactivité contenue dans les déchets existants<sup>23</sup>.

Enfin, un autre moyen d'examiner l'impact des déchets nucléaires produits par le nouveau programme de réacteurs proposé par le Royaume-Uni consiste à examiner la zone souterraine susceptible d'être occupée par les déchets existants et la zone susceptible d'être occupée par les déchets existants plus les déchets provenant d'un programme de nouveaux réacteurs de 16 GW. La superficie requise dépendra du type de roche utilisé<sup>24</sup>.

Type de roche	Inventaire des déchets créés par les réacteurs existants	Inventaire des déchets provenant des réacteurs existants et du nouveau programme de 16 GW
Roche haute résistance	5,6 km <sup>2</sup>	12,3 km <sup>2</sup>
Roche faible résistance	10,3 km <sup>2</sup>	25,0 km <sup>2</sup>
Évaporite	8,8 km <sup>2</sup>	24,1 km <sup>2</sup>

On peut constater que la surface souterraine requise pour « le stockage » des déchets est presque triplée dans certains cas par le programme de construction de nouveaux réacteurs.

## DOSSIER DE SÛRETÉ DE L'INSTALLATION DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE

En 2010, les experts de *Nuclear Waste Advisory Associates* (NWAA) a publié un « registre des problèmes » répertoriant 100 problèmes en suspens qui doivent être résolus avant que nous puissions ne serait-ce que commencer à produire un dossier de sûreté adéquat pour une installation de stockage géologique<sup>25</sup>. Tout comme d'autres recherches similaires, comme le rapport de Greenpeace International « Rock Solid »<sup>26</sup>, ces études soulèvent la question de savoir s'il sera un jour possible de démontrer avec une quelconque crédibilité scientifique que la dose de rayonnement reçue par des personnes du fait d'un site de stockage de déchets nucléaires pourrait rester à un niveau acceptable jusque dans un avenir très lointain.

## COÛTS

Les modèles de coûts actuels pour l'installation de stockage prévue pour les déchets radioactifs arrivaient à 12 milliards de livres sterling en 2008, mais ils excluent le combustible irradié provenant de nouveaux réacteurs nucléaires. Mais comme dans le monde entier, les incertitudes sont énormes. Même s'il avait été initialement prévu de facturer un prix fixe pour le combustible irradié nouvellement produit, il a été remplacé en 2011 par un prix de transfert des déchets variable, mais plafonné (Waste Transfer Price - WTP). Le prix de transfert des déchets augmentera avec le temps, à mesure que les coûts de réalisation finaux liés à l'emplacement, à la construction et à l'exploitation du site de stockage en profondeur seront mieux compris. Les incertitudes et les sous-estimations probables des coûts ont été soulignées par le consultant Ian Jackson en 2011<sup>27</sup>. Les 978 000 livres sterling prévues pour chaque tonne d'uranium (dans le combustible usé) pourraient s'avérer insuffisantes pour couvrir les coûts du gouvernement alors qu'il fait l'hypothèse que les coûts du stockage des déchets nucléaires augmenteront de 3,3 % par an au-delà de l'inflation. Toutefois, l'expérience passée montre que les coûts du nucléaire augmentent généralement entre 4,2 et 4,5 % au-dessus de l'inflation. En cas de sous-estimation des coûts, l'Autorité britannique de démantèlement nucléaire (Nuclear Decommissioning Authority - NDA) ne recouvrera pas intégralement la totalité des coûts du stockage des combustibles usés provenant des nouveaux réacteurs. La NDA aura donc besoin d'une subvention gouvernementale indirecte pour combler la différence.

---

## CONCLUSIONS

Le Conseil du comté de Cumbria, la région britannique qui a enregistré le plus de tentatives de recherche de sites pour une installation de stockage géologique, a jugé que la toute dernière tentative du gouvernement était fondamentalement viciée. Le Conseil déplore en particulier l'incapacité du gouvernement à répondre au besoin d'un entreposage provisoire sécurisé, alors pourtant que les éléments les plus dangereux contenus dans les déchets seront trop chauds pendant largement plus d'un siècle pour être enfouis<sup>28</sup>. On peut donc avoir de sérieux doutes quant au fait que des progrès seront réalisés. Diverses études ont soulevé la question de savoir s'il sera un jour possible de démontrer avec une quelconque crédibilité scientifique que la dose de rayonnement reçue par des personnes du fait d'un site de stockage de déchets nucléaires pourrait rester à un niveau acceptable jusque dans un avenir très lointain.

Dans le même temps, le Royaume-Uni s'est embarqué dans un programme de construction de nouvelles centrales, qui entraînera une augmentation considérable de la radioactivité provenant du combustible usé et d'autres déchets hautement radioactifs qui devront être entreposés indéfiniment sur des sites vulnérables dispersés sur nos côtes.

## ANNEXE - LES CINQ TENTATIVES PRÉCÉDENTES POUR TROUVER UN SITE

### Première tentative :

1976: L'Autorité britannique de l'énergie atomique (UKAEA) commence la recherche d'un site de stockage en profondeur.

1981: Les enquêtes publiques suscitent une opposition massive au programme, mais les sondages de reconnaissance ne sont effectués que sur un seul site – Altnabreac, dans le comté de Caithness. Le gouvernement britannique recule et abandonne le programme de sondages en décembre 1981.

### Deuxième tentative :

1982: L'organisation Nirex est créée et annonce une nouvelle politique: une mine profonde d'anhydrite sous Billingham dans le comté de Cleveland est proposée comme site pour les déchets de moyenne activité, et Elstow, dans le Bedfordshire, est proposé comme site d'enfouissement à faible profondeur des déchets de faible activité.

1986: Billingham est abandonné.

### Troisième tentative :

1987: Trois sites supplémentaires sont désignés et viennent rejoindre Elstow.

Mai 1987: Le gouvernement britannique abandonne le programme.

### Quatrième tentative :

Nov 1987: Nirex lance « La voie à suivre » (« *The Way Forward* »).

1989: Nirex se concentre sur Sellafield et Dounreay.

Mars 1997: Le gouvernement britannique rejette la demande de permis de construire de Nirex pour Sellafield.

### Cinquième tentative :

Juillet 2002: le gouvernement britannique annonce qu'il va mettre en place un nouveau comité indépendant, le Comité sur la gestion des déchets radioactifs (CoRWM), chargé d'examiner les options de gestion des déchets radioactifs et de formuler des recommandations. Il recommande un site de stockage site géologique profond mais formule des mises en garde importantes.

Août 2012: Publication du rapport du Partenariat pour une gestion sûre des déchets radioactifs.

Janvier 2013: Le conseil du comté de Cumbria décide de se retirer du processus.

- 
- 1 Department for Business, Energy and Industrial strategy (BEIS), énergétique et industrielle (BEIS) Communiqué de presse du 25 janvier 2018  
<https://www.gov.uk/government/news/local-communities-to-give-views-on-permanent-disposal-of-radioactive-déchets>
  - 2 History of Waste Disposal Proposals in Britain, Site web No2NuclearPower, le 3 février 2016  
<http://www.no2nuclearpower.org.uk/radwaste/history-of-nuclear-waste-disposal-proposals-in-britain/>
  - 3 Managing our radioactive Waste Safely, CoRWM's Recommendations to Government July 2006  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/294118/700\\_-\\_CoRWM\\_July\\_2006\\_Recommendations\\_to\\_Government\\_pdf.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/294118/700_-_CoRWM_July_2006_Recommendations_to_Government_pdf.pdf)
  - 4 Lettre au Guardian du professeur Andy Blowers, 24 janvier 2018  
<https://www.theguardian.com/environment/2018/jan/24/exposing-uk-government-foolly-of-investment-in-new-nuclear>
  - 5 Guardian 30th Jan 2013  
<http://www.guardian.co.uk/environment/2013/jan/30/cumbria-rejectsunderground-nuclear-storage>
  - 6 Voir <http://www.westcumbriamrws.org.uk/page/83/Introduction.htm>
  - 7 Final report of the West Cumbria Managing Radioactive Waste Safely Partnership, WCMRWS 16 août 2012.  
[http://www.westcumbriamrws.org.uk/documents/306-The\\_Partnership's\\_Final\\_Report\\_août\\_2012.pdf](http://www.westcumbriamrws.org.uk/documents/306-The_Partnership's_Final_Report_août_2012.pdf)
  - 8 Voir carte en page 6 sur [http://www.westcumbriamrws.org.uk/documents/115-BGS\\_non-technical\\_summary.pdf](http://www.westcumbriamrws.org.uk/documents/115-BGS_non-technical_summary.pdf)
  - 9 [https://www.geos.ed.ac.uk/homes/rsh/Allerdale\\_and\\_Copeland.html](https://www.geos.ed.ac.uk/homes/rsh/Allerdale_and_Copeland.html)
  - 10 Voir <http://www.davidsmythe.org/nuclear/nuclear.htm>
  - 11 Cumbria Trust 15 janvier 2018 <https://cumbriatrust.wordpress.com/2018/01/15/a-change-of-view-for-tim-knowles/>
  - 12 Managing Risk Reduction at Sellafield, National Audit Office, novembre 2012.  
[http://www.nao.org.uk/publications/1213/sellafield\\_risk\\_reduction.aspx](http://www.nao.org.uk/publications/1213/sellafield_risk_reduction.aspx)
  - 13 BBC 7 novembre 2013  
<http://www.bbc.co.uk/news/uk-england-cumbria-20228176>
  - 14 Nuclear Decommissioning Authority : Managing risk at Sellafield, Public Accounts Committee 4 février 2013  
<http://www.publications.parliament.uk/pa/cm201213/cmselect/cmpubacc/746/746.pdf>
  - 15 Telegraph 19th June 2018  
<https://www.telegraph.co.uk/politics/2018/06/19/sellafield-plutonium-decaying-faster-anticipated-intolerable/>
  - 16 Carlisle News and Star, 26 avril 2018  
<http://www.newsandstar.co.uk/news/Search-to-find-nuclear-waste-storage-site-is-flawed-Cumbria-council-chiefs-claim-c7de9658-2bf6-42f2-8785-d1b67d5ef835-ds>
  - 17 Energy White Paper: Our Energy Future, Creating a Low Carbon Economy, février DTI, 2003.  
<http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+www.berr.gov.uk/files/file10719.pdf>
  - 18 Meeting the Energy Challenge : A White Paper on Nuclear Power, BERR, janvier 2008, para 2.137  
<http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20100512172052/http://www.decc.gov.uk/media/viewfile.ashx?filepath=what%20we%20do/uk%20energy%20supply/energy%20mix/nuclear/whitepaper08/file43006.pdf&filetype=4>
  - 19 Re-iteration of CoRWM's Position on Nuclear New Build, Gordon Mackerron, septembre 2007. Page 3  
[http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20130717140311/http://corwm.decc.gov.uk/assets/corwm/pre-nov%202007%20doc%20archive/doc%20archive/tier%202%20\(7\)%20-%20implementation%20advice/2162%2020-%20corwm%20position%20on%20new%20build%20reiterated.pdf](http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20130717140311/http://corwm.decc.gov.uk/assets/corwm/pre-nov%202007%20doc%20archive/doc%20archive/tier%202%20(7)%20-%20implementation%20advice/2162%2020-%20corwm%20position%20on%20new%20build%20reiterated.pdf)
  - 20 Lettre au Guardian du professeur Andy Blowers, 24 janvier 2018  
<https://www.theguardian.com/environment/2018/jan/24/exposing-uk-government-foolly-of-investment-in-new-nuclear>
  - 21 Geological Disposal - Feasibility studies exploring options for storage, transport and disposal of spent fuel from potential new nuclear power stations (NDA/RWMD/060/Rev1), RWM janvier 2014  
<https://rwm.nda.gov.uk/publication/geological-disposal-feasibility-studies-exploring-options-for-storage-transport-and-disposal-of-spent-fuel-from-potential-new-nuclear-power-stations/>



---

22 Nuclear Industry Association website consulté le 9 juillet 2018

<https://www.niauk.org/industry-issues/waste-management/>

23 An overview of the differences between the 2013 Derived Inventory and the 2010 Derived Inventory, RWM Ltd, juillet 2015

<https://rwm.nda.gov.uk/publication/differences-between-2013-and-2010-derived-inventory/>

24 Higher Level Radioactive Waste: Likely inventory range ; the process for altering it; how the community might influence it and understanding the implications of new nuclear build. Présenté au West Cumbria Managing Radioactive Waste Safely Partnership. Voir Tableau 3

[http://www.westcumbriamrws.org.uk/documents/94-Inventory\\_critique\\_Pete\\_Roche.pdf](http://www.westcumbriamrws.org.uk/documents/94-Inventory_critique_Pete_Roche.pdf)

25 NWAA Issues Register, 2010

<http://www.nuclearwasteadvisory.co.uk/wp-content/uploads/2011/06/NWAA-ISSUES-REGISTER-COMMENTARY.pdf>

26 Rock Solid? A scientific review of geological disposal of high-level radioactive waste, par le Dr Helen Wallace, Greenpeace 2010

<http://www.greenpeace.org/eu-unit/en/Publications/2010/rock-solid-a-scientific-review/>

27 Ian Jackson, Research Report « Subsidy Assessment of Waste Transfer Pricing for Disposal of Spent Fuel from New Nuclear Power Stations »; Independent Report for Greenpeace UK, 1er mars 2011,

<https://www.greenpeace.org.uk/wp-content/uploads/2017/07/FUP-Subsidy-Report-Mar2011.pdf>

28 Cumbria Trust 29 avril 2018

<https://cumbriatrust.wordpress.com/2018/04/29/gdf-site-search-is-flawed-cumbria-council-chiefs-claim/>

7

**ÉTATS-UNIS**

# LES DÉCHETS NUCLÉAIRES DE HAUTE ACTIVITÉ AUX ÉTATS-UNIS

Robert Alvarez

Au cours des 60 années qui ont suivi le démarrage de la production d'électricité nucléaire, le parc de réacteurs nucléaires aux États-Unis a généré environ 30% du stock mondial total de combustibles nucléaires usés – de loin la part la plus importante<sup>1,2</sup>. Il représente environ 80 150 tonnes, stockées sur 125 sites de réacteurs, dont 99 encore opérationnels<sup>3</sup>.

Les dangers exceptionnels des déchets radioactifs de haute activité générés par les réacteurs ont été décrits par le professeur Abel Wolman de l'Université Johns Hopkins en janvier 1959, lors de la première enquête du Congrès américain sur le sujet. *« Leur toxicité, en termes généraux, à la fois radioactive et chimique, est de loin supérieure à celle de n'importe quel matériau industriel auquel nous ayons été confrontés jusqu'à maintenant, que ce soit dans ce pays ou dans tout autre pays »,* a-t-il indiqué. *« Nous éliminons les déchets de presque tous les secteurs industriels aux États-Unis en les convertissant réellement en matériaux inoffensifs »,* a souligné A. Wolman. *« C'est la première catégorie de déchets dans une quelconque industrie pour laquelle ce type d'élimination n'existe pas. »*

L'observation d'A. Wolman reste vraie et les pays qui disposent de centrales électronucléaires cherchent à confiner quelques-unes des plus grandes concentrations d'éléments radioactifs artificiels sur une échelle de temps qui dépasse largement l'ère géologique définissant la présence d'une civilisation humaine. En 2012, on estimait que le combustible nucléaire usé aux États-Unis contenait au total 851 000 PBq (23 milliards de curies) de radioactivité<sup>4</sup>. Chaque année, environ 2 200 tonnes de combustibles usés sont générées et le total devrait atteindre environ 146 500 tonnes d'ici 2048, soit plus de 1 221 000 PBq (plus de 33 milliards de curies).

Le combustible nucléaire usé des centrales nucléaires américaines se compose de plus de 244 000 assemblages rectangulaires longs contenant des dizaines de millions de crayons combustibles<sup>5</sup>. Ces crayons contiennent à leur tour des milliards de pastilles d'uranium irradiées, de la taille d'un doigt. Après avoir été bombardées par des neutrons dans le cœur du réacteur, environ 5 à 6% des pastilles sont converties en une myriade d'éléments radioactifs dont les demi-vies vont de quelques secondes à des millions d'années. Si l'on se tient à moins d'un mètre de combustible nucléaire usé déchargé depuis un an, on est sûr de recevoir une dose d'irradiation mortelle en 20 secondes environ<sup>6</sup>.

Cependant, après de nombreuses années consacrées à la fusion des réacteurs, il devient évident que l'accumulation importante de combustible nucléaire usé dans les piscines des réacteurs américains présente un danger potentiel beaucoup plus important. En effet, les piscines contiennent plusieurs cœurs irradiés, soit 3 à 4 fois plus de combustible nucléaire usé que ce qui était prévu par les concepts d'origine. Les piscines ne disposent pas de moyens de défense en profondeur tels qu'une enceinte de confinement secondaire ou une alimentation électrique de secours qui leur soit propre. La chaleur provenant de la décroissance radioactive du combustible nucléaire irradié constitue un problème de sûreté majeur. Quelques heures après le déchargement du cœur d'un réacteur, celui-ci peut initialement dégager suffisamment de chaleur par décroissance radioactive pour être équivalent à la puissance d'un four d'aciérie. Il est suffisamment chaud pour faire fondre et mettre le feu à la gaine en zirconium réactif du combustible et déstabiliser le site de stockage géologique dans lequel il serait placé. Au bout de 100 ans, la chaleur et la radioactivité décroissent considérablement mais restent dangereuses.

L'accident de Fukushima en mars 2011 a clairement montré que le risque thermique élevé des piscines de combustible usé n'était pas un problème abstrait. À la suite du séisme et du tsunami, une explosion a détruit le bâtiment réacteur de l'unité 4, exposant à l'air libre la piscine contenant l'équivalent d'un cœur complet de combustibles nucléaires irradiés récemment déchargés. Par chance, la fuite accidentelle d'une conduite d'eau qui n'était pas destinée à alimenter la piscine de refroidissement a empêché les niveaux d'eau de baisser dans la piscine et a ainsi évité un incendie grave des gaines en zirconium surchauffées<sup>7</sup>.

## LES DANGERS DE L'ENTREPOSAGE DES COMBUSTIBLES NUCLÉAIRES USÉS DANS DES PISCINES

Pendant près de 30 ans, les exigences de la Commission de réglementation nucléaire américaine (NRC) en matière d'entreposage des déchets ont été conditionnées par l'ouverture en temps voulu d'un site de stockage permanent des déchets. Cela a permis aux exploitants d'entreposer légalement le combustible usé dans des piscines de refroidissement sur site beaucoup plus longtemps et à des densités plus élevées (en moyenne quatre fois plus élevées) que ce qui était prévu à l'origine.

Des décennies de recherche sur la sûreté nucléaire ont montré que des accidents graves dus à la chaleur résiduelle peuvent se produire si une piscine de refroidissement de combustible usé perd une quantité importante d'eau. Si les assemblages de combustible dans une piscine sont exposés à l'air et à la vapeur, leur revêtement de zirconium réagira de manière exothermique, en prenant feu après plusieurs heures ou jours à la manière d'un énorme feu d'artifice. (En raison de sa réactivité élevée à la chaleur, le zirconium était autrefois utilisé comme filament dans les ampoules de flashes d'appareil photo.)

Selon la NRC, 69 radionucléides présents dans le combustible nucléaire usé pourraient avoir des conséquences significatives en cas d'accident (voir liste 1)<sup>8</sup>.

### Liste 1 : les 69 nucléides importants pour les études portant sur les conséquences d'accident

241Am, 137mBa, 139Ba, 140Ba, 141Ce, 143Ce, 144Ce, 242Cm, 244Cm, 58Co †, 60Co †, 134Cs, 136Cs, 137Cs, 131I, 132I, 133I, 134I, 135I, 85Kr, 85mKr, 87Kr, 88Kr, 140La, 141La, 142La, 99Mo, 95Nb, 97Nb, 97mNb, 147Nd, 239Np, 143Pr, 144Pr, 144mPr, 238Pu, 239Pu, 240Pu, 241Pu, 86Rb, 88Rb, 103mRh, 105Rh, 106Rh, 103Ru, 105Ru, 106Ru, 89Sr, 90Sr, 91Sr, 92Sr, 99mTc, 127Te, 127mTe, 129Te, 129mTe, 131Te, 131mTe, 132Te, 133Xe, 135Xe, 135mXe, 90Y, 91Y, 91mY, 92Y, 93Y, 95Zr, 97Zr

J. A. Rollstin, D. I. Chanin et H.-N. Jow, MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS), Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-4691 Vol.3, 2007

Si le combustible était exposé à l'air et à la vapeur, le revêtement en zirconium réagirait de manière exothermique et prendrait feu à environ 800-1000 degrés Celsius. Ce qui est particulièrement inquiétant, c'est la présence de 44 à 84 millions de curies en moyenne d'un isotope dangereux, le césium 137, dans les piscines de combustibles usés américaines. Avec une demi-vie de 30 ans, le césium 137 émet des rayonnements très pénétrants et est absorbé dans la chaîne alimentaire comme s'il s'agissait de potassium.

La démonstration des dommages causés par un important rejet de produits de fission, en particulier le césium 137, a été faite à la suite des accidents de Tchernobyl et de Fukushima. L'accident de Tchernobyl a obligé à la réinstallation définitive de 100 000 personnes en raison de la contamination par le césium 137. La superficie totale de cette zone d'exclusion est énorme : plus de 1 000 kilomètres carrés, soit environ les deux tiers de la superficie de l'État du New Jersey. Au cours de la décennie suivante, la population de cette zone a diminué de près de moitié en raison de son exode vers des zones moins contaminées.

Suite aux attentats terroristes du 11 septembre 2001, mes collègues et moi avons publié un article mettant en garde contre des actes de malveillance ou des accidents qui pourraient entraîner la vidange de piscines de combustible nucléaire usé aux États-Unis, et amener ainsi les gaines en zirconium à prendre feu et à dégager des quantités catastrophiques d'éléments radioactifs à vie longue, bien plus qu'en cas de fusion du cœur d'un réacteur<sup>9</sup>.

Cet article a été suivi en 2016 par un texte de mes collègues indiquant que si un tel incendie se produisait dans le réacteur à eau bouillante de Limerick, près de Philadelphie, les retombées radioactives pourraient obliger environ huit millions de personnes à déménager et entraîner 2 000 milliards de dollars de dommages et intérêts<sup>10</sup>. Hormis une guerre majeure, il n'existe que peu ou pas d'accidents technologiques qui puisse rivaliser avec les conséquences d'un incendie important dans une piscine de combustible usé.

Le propre modèle de dispersion de la NRC de 2007 utilisé par les services d'urgence estimait que, dans les six heures qui suivraient la vidange de la piscine après un séisme majeur à la centrale nucléaire de San Onofre, les gaines de combustible usé prendraient feu, libérant environ 86 millions de curies de substances radioactives dans l'atmosphère. Sur ce nombre, environ 30 % du césium radioactif contenu dans le combustible usé (environ 40 millions de curies) serait relâché, soit plus de 150 % de la quantité libérée par l'ensemble des essais atmosphériques d'armes nucléaires. Une zone située dans un rayon de 10 miles (314 miles carrés, soit 813 kilomètres carrés de terres et d'eaux littorales) pourrait être contaminée<sup>11</sup>.

Naoto Kan, qui était le Premier ministre du Japon lors de l'accident de Fukushima, a très clairement souligné ce point. Après avoir été informé des conséquences si le combustible irradié présent dans la piscine du réacteur 4 de Fukushima avait pris feu, il a déclaré plus tard

**“ [Nous] aurions dû évacuer 50 millions de personnes. Cela aurait été comme perdre une guerre majeure... Je craignais qu'il en résulte des décennies de bouleversements et que cela se traduise par la fin de l'État japonais<sup>12</sup> . ”**

Actuellement, environ 70 % des quelque 244 000 assemblages de combustibles usés aux États-Unis se trouvent dans les piscines de refroidissement de centrales nucléaires américaines, les 30 % restants étant dans des conteneurs d'entreposage à sec. Environ un tiers du combustible usé entreposé en piscine se trouve dans des réacteurs à eau bouillante vieux de plusieurs décennies, dans des piscines construites à plusieurs étages au-dessus du sol ; le reste se trouvant dans des réacteurs à eau sous pression, où les piscines de refroidissement sont encastrées dans le sol. Pour réduire de manière significative la probabilité d'un tel événement, nous avons appelé à mettre fin à l'entreposage haute densité des combustibles nucléaires irradiés et à la mise en place de la plus grande partie des combustibles nucléaires usés dans des conteneurs de stockage à sec renforcés. Selon nos estimations, ce changement dans les modalités d'entreposage des combustibles pourrait être réalisé dans un délai de 10 ans, pour un coût compris entre 3,5 et 7 milliards de dollars<sup>13</sup>.

En mai 2016, pour la deuxième fois, un groupe d'experts de l'Académie nationale des sciences a réfuté les manifestations de confiance exprimées par la NRC par rapport à la sûreté des piscines de combustibles usés. Constatant des failles dans les hypothèses techniques de l'agence, le groupe d'experts a déclaré que la perte de refroidissement de la piscine de combustible usé sur le site de Fukushima « devrait rappeler aux exploitants de centrales nucléaires et aux autorités de contrôle l'importance cruciale de disposer de moyens robustes et redondants pour mesurer, maintenir et, si nécessaire, restaurer le refroidissement des piscines. » Les membres ont également exhorté la NRC à « veiller à ce que les exploitants de centrales prennent des mesures rapides et efficaces pour réduire les conséquences d'un accident par perte de refroidissement dans des piscines de combustible qui pourrait aboutir à la propagation de feux de zirconium. »

### **COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE USÉ À TAUX DE COMBUSTION ÉLEVÉ**

Depuis les années 1990, les exploitants de réacteurs américains ont été autorisés par la Commission de réglementation nucléaire (NRC) des États-Unis à véritablement doubler la durée d'irradiation du combustible nucléaire dans un réacteur, en autorisant une augmentation du pourcentage d'uranium 235, le matériau fissile essentiel pour la production d'énergie. Connue sous le nom d'augmentation du taux de combustion, cette pratique est exprimée par la quantité d'électricité en mégawatts (MW) par jour produite à partir d'une tonne d'uranium. Les centrales nucléaires commerciales américaines utilisent du combustible à l'uranium dont le pourcentage en uranium 235 – son principal isotope fissile – a été augmenté ou enrichi par rapport à la teneur trouvée dans les gisements de minerai d'uranium naturel. Pendant les premières décennies d'exploitation commerciale, le niveau d'enrichissement a permis aux centrales nucléaires américaines de fonctionner pendant environ 12 mois entre deux rechargements. Ces dernières années, toutefois, les compagnies électriques américaines ont commencé à utiliser ce que l'on appelle un combustible à fort taux de combustion, défini comme un combustible dont le taux de combustion est supérieur à 45 GWj/t.

Le combustible nucléaire usé à fort taux de combustion s'avère un obstacle à la sûreté de l'entreposage et du stockage définitif du combustible nucléaire usé.

---

Depuis plus d'une décennie, les preuves des impacts négatifs sur les gaines et les pastilles des combustibles à taux de combustion élevé se sont accumulées alors que la résolution de ces problèmes demeure hors d'atteinte. Les recherches montrent que l'épaisseur de la gaine du combustible usé est réduite et qu'une oxydation induite par l'hydrogène se forme sur le zirconium métallique utilisé pour les gaines, et que cet amincissement peut conduire à la fragilisation et à la rupture des gaines. Les températures élevées du combustible à fort taux de combustion augmentent la vulnérabilité du combustible nucléaire usé lors de la manutention et du transport.

« Les bases techniques pour le combustible usé actuellement déchargé (combustible à fort taux de combustion et d'utilisation) ne sont pas bien établies », note un expert de l'Académie nationale d'ingénierie en 2012<sup>14</sup>. En mai 2016, le Conseil d'examen technique des déchets nucléaires (NWTRB), un groupe d'experts chargé de la supervision scientifique du Département de l'énergie (DOE) sur l'élimination du combustible usé a estimé qu'il existait peu de données, voire aucune, pour justifier l'entreposage à sec et le transport des combustibles usés avec des taux de combustion supérieurs à 35 gigawatts-jours par tonne d'uranium<sup>15</sup>. Au cours des 20 dernières années, plus de 70% du stock total de combustible nucléaire usé produit provient de combustibles à fort taux de combustion<sup>16</sup>. En 2013, seulement 8% du combustible usé à fort taux de combustion était entreposé dans des conteneurs d'entreposage à sec<sup>17</sup>.

### **MANQUE DE PLANIFICATION DE L'ENTRE- POSAGE ET DU STOCKAGE DÉFINITIF**

Récemment, un rapport de Bloomberg sur le financement de l'énergie a laissé entendre que d'autres fermetures de réacteurs pourraient intervenir: « Plus de la moitié des réacteurs nucléaires américains perdent dangereusement de l'argent et le total de leurs pertes avoisine les 2,9 milliards de dollars par an. » La fermeture accélérée d'un plus grand nombre de réacteurs américains pourrait sérieusement perturber un système qui ne dispose pas de la planification et de la logistique nécessaires à la gestion d'un stock de déchets en croissance rapide. Près de 20% du combustible nucléaire usé du pays se trouve dans des réacteurs fermés ou qui seront bientôt fermés<sup>18</sup>.

Le transport du combustible nucléaire usé est encore compliqué car l'entreposage sur les sites de réacteurs oblige à une combinaison complexe de conteneurs; chaque système de conteneur de combustible nucléaire usé présente ses propres difficultés.

La NRC a autorisé 51 modèles différents de conteneurs pour entreposage à sec, dont 13 qui sont destinés uniquement au stockage et non pas au transport. Il faudra peut-être rouvrir ou reconditionner jusqu'à 11 800 conteneurs d'entreposage à sec sur place avant leur transport vers une installation de stockage intermédiaire centralisé ou vers un site de stockage permanent<sup>19</sup>.

La génération actuelle de conteneurs d'entreposage à sec était destinée à un entreposage sur site de courte durée, et non à un stockage direct dans un site d'enfouissement. Aucun des conteneurs d'entreposage à sec de combustible nucléaire usé n'est autorisé pour un stockage à long terme. Les grands conteneurs d'entreposage utilisés dans les centrales électriques peuvent représenter un fardeau important pour un site de stockage géologique en termes de manipulation et de mise en place de colis encombrants présentant des charges thermiques importantes et une radioactivité élevée.

En effet, le reconditionnement en vue du stockage final peut nécessiter des dizaines de milliers de conteneurs plus petits et, à un coût moyen estimé de 50 000 à 87 000 dollars par assemblage de combustible usé, le reconditionnement ne sera pas bon marché. Le coût estimé de la gestion des déchets faiblement radioactifs provenant du retrait des combustibles usés pour les mettre dans de nouveaux conteneurs est estimé à 9 500 dollars par assemblage et pourrait dépasser le coût actuel du chargement d'un assemblage dans un conteneur<sup>20</sup>.

---

D'ici à ce qu'un site d'entreposage intermédiaire centralisé soit disponible, il pourrait y avoir une « vague » d'arrêts de réacteurs susceptible de saturer les transports et de perturber le calendrier de fonctionnement de l'entreposage centralisé. Différentes incertitudes sont identifiées par le DOE :

- Les infrastructures de transport sur les sites des réacteurs ou à proximité changent et évoluent.
- Chaque système de conteneur de combustible nucléaire usé présente des difficultés qui lui sont propres. Par exemple, certains conteneurs d'entreposage à sec ne sont autorisés que pour l'entreposage et non pour le transport.
- Les contraintes liées à la chaleur résiduelle du combustible nucléaire usé peuvent avoir une incidence sur le calendrier du transport.
- L'ordre d'enlèvement et de transport des combustibles usés reste à déterminer. L'hypothèse a été faite que les plus anciens auraient la priorité, ce qui laisserait les sites avec des combustibles plus récents et thermiquement plus chauds qui pourraient se retrouver « piégés » sur les sites, en attente de refroidissement<sup>21</sup>.

### **L'INACCESSIBLE QUÊTE D'UN SITE DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE**

En 2008, le DOE a publié une estimation révisée des coûts de cycle de vie qui atteint 113 milliards de dollars (dollars 2016) pour le stockage définitif de 70 000 tonnes de combustible usé de réacteur commercial sur le site de Yucca Mountain<sup>22</sup>. Selon la législation en vigueur, une plus grande quantité de combustible nucléaire usé devrait être stockée dans un second site de stockage. En application de la loi sur la politique en matière de déchets nucléaires, le coût du stockage doit être payé par une taxe prélevée sur le consommateur d'électricité nucléaire à raison d'un millième de dollar (0,001 USD) par kilowattheure. Cette taxe ne couvre pas les coûts estimés en milliards de dollars associés à l'entreposage en surface, au transport et au reconditionnement avant le stockage définitif. Les efforts visant à relancer le processus d'octroi de licences à Yucca Mountain restent au point mort.

Après l'annulation du projet de Yucca Mountain en 2010, le Département américain de l'énergie a estimé que le transport de 122 100 tonnes de combustible nucléaire usé nécessiterait 16 ans pour le transport et 50 ans pour la mise en place totale dans le site de stockage. Le site de stockage serait définitivement fermé au bout de 150 ans<sup>23</sup>. Le retraitement du combustible nucléaire usé avant son élimination n'est pas considéré comme une option viable. L'Electric Power Research Institute, une organisation du secteur de l'énergie aux États-Unis, conclut : « *L'adoption à court terme du retraitement du combustible usé aux États-Unis entraînerait une augmentation substantielle des coûts [...] le retraitement devrait être accompagné du déploiement de centrales à réacteurs à neutrons rapides. Mais, jusqu'à maintenant, la démonstration des réacteurs à neutrons rapides s'est avérée essentiellement coûteuse et peu fiable, ce qui aggrave le handicap économique du retraitement.*<sup>24</sup> »

Le site de stockage de Yucca Mountain a été choisi avant tout par le Congrès américain en 1987 pour éviter la controverse politique grandissante sur l'implantation d'un site de stockage définitif dans l'est des États-Unis. Le site de Yucca Mountain ne répond pas aux exigences géologiques fondamentales pour le stockage à long terme établies par l'Agence internationale de l'énergie atomique. Parmi celles-ci figurent « *des conditions géochimiques ou hydrochimiques stables en profondeur, principalement décrites par un environnement réducteur et une composition contrôlée par un équilibre entre l'eau et les minéraux formant les roches; et une stabilité géologique à long terme (millions d'années) en termes de grands mouvements de la terre et de déformations, failles, sismicité et flux thermiques* ». Avec la possibilité d'une éruption volcanique dans le délai de 10 000 ans fixé pour le confinement des déchets et l'infiltration de l'humidité, Yucca Mountain ne satisfait ni à l'une ni à l'autre de ces conditions<sup>25,26</sup>.

---

Selon le DOE, le site nécessite une ventilation forcée pendant au moins 100 ans pour éliminer la chaleur résiduelle qui pourrait impacter les conteneurs de déchets et la géologie du site<sup>27</sup>. Il sera nécessaire d'assurer la maintenance du réseau électrique, du réseau ferroviaire et des autres systèmes de transport pour desservir le site de stockage pendant environ 150 ans. Après avoir affirmé pendant des années que le site de Yucca Mountain était sec, le DOE a admis que l'humidité pouvait pénétrer et mettre en péril les colis de déchets<sup>28</sup>.

Ainsi, après environ 100 ans, dans un environnement à haute température dangereux, il est prévu de mettre en place plus de 11 000 grands boucliers d'étanchéité en titane pour empêcher l'humidité de corroder les emballages de déchets<sup>29</sup>. Les écrans anti-gouttes nécessiteraient près des deux tiers de la consommation annuelle de titane dans le monde<sup>30</sup>.

### **CE QUI DOIT ÊTRE FAIT**

L'approche de base adoptée dans ce pays consiste à poursuivre ces 60 années de recherche de sites de stockage géologique et à espérer que tout se passera bien. Pendant ce temps-là, les États-Unis n'ont pas de politique cohérente pour l'entreposage en surface à long terme, qui est de plus en plus probable. Compte tenu des incertitudes importantes associées, le Département américain de l'énergie a déclaré qu'un «*entreposage prolongé, d'une durée maximale de 300 ans, est envisagé aux États-Unis.*<sup>31</sup>» Un expert de l'industrie nucléaire estime que, à moins que le gouvernement fédéral ne trouve un moyen de relancer les efforts pour implanter rapidement un site de stockage, le programme du DOE pourrait ne jamais avoir à retirer du combustible usé d'un site en exploitation.<sup>32</sup>»

La politique nationale d'entreposage et de stockage définitif des combustibles nucléaires usés doit être fondamentalement réorganisée pour remédier aux vulnérabilités du stockage du combustible usé dans les piscines. Avant tout, pour protéger la sécurité du public, le stockage à haute densité de combustibles nucléaires usés devrait prendre fin.

En avril 2017, le *Government Accountability Office*, l'organisme d'investigation du Congrès américain, a déclaré que «*le combustible nucléaire usé peut poser de sérieux risques pour l'homme et l'environnement et représente un poids de **plusieurs** milliards de dollars de passif financier pour le gouvernement américain. Selon le Conseil américain de la recherche et d'autres organismes, s'ils ne sont pas manipulés et entreposés correctement, ces matériaux peuvent diffuser une contamination et causer des problèmes de santé à long terme chez l'homme ou même le décès/s'avérer fatals.*<sup>33</sup>»

Au lieu d'attendre que des problèmes surviennent, la NRC et le Département de l'énergie doivent élaborer une feuille de route transparente et complète identifiant les principaux éléments – et en particulier les incertitudes qui les concernent – de l'entreposage, du transport, du reconditionnement et du stockage définitif de tous les combustibles nucléaires, y compris ceux qui présentent un fort taux de combustion. Dans le cas contraire, les États-Unis continueront de s'appuyer sur de simples actes de foi en matière de stockage des déchets nucléaires – des actes de foi qui ouvrent la voie à l'avenir au remboursement d'importants «*prêts hypothécaires*» sur les déchets radioactifs qui seront supportés par le contribuable à l'avenir.



- 
- 1 Peter Swift, Recent developments in the disposal of high-level waste and spent nuclear fuel, U.S. Department of Energy, National Nuclear Security Administration, Sandia National Laboratory, 18 octobre 2017.  
<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/11/f46/Peter%20Swift%20PRACoP%202017%20final.pdf>
  - 2 Carylyn Greene, An Overview of Spent Fuel Storage in the United States, Ux Consulting Company, LLC, 23 janvier 2018.  
[https://www.inmm.org/INMM/media/Documents/Presentations/Spent%20Fuel%20Seminar/2018%20Spent%20Fuel%20Seminar/1-23-18\\_1300-1-Greene-An-Overview-of-Spent-Fuel-Storage-in-the-US.pdf](https://www.inmm.org/INMM/media/Documents/Presentations/Spent%20Fuel%20Seminar/2018%20Spent%20Fuel%20Seminar/1-23-18_1300-1-Greene-An-Overview-of-Spent-Fuel-Storage-in-the-US.pdf)
  - 3 Op. cit. Réf. 1.
  - 4 U.S. Department of Energy, Nuclear Waste Technical Review Board, Commercial spent Nuclear Fuel (2017).  
[http://www.nwtrb.gov/docs/default-source/facts-sheets/overview\\_snf\\_hlw.pdf?sfvrsn=15](http://www.nwtrb.gov/docs/default-source/facts-sheets/overview_snf_hlw.pdf?sfvrsn=15)
  - 5 U.S. Department of Energy, Energy Information Administration, Nuclear Fuel Data Survey, GC-859, (2013)
  - 6 Allan Hedin, Spent nuclear fuel – how dangerous is it?, Technical Report 97-12. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Suède, Agence internationale de l'énergie atomique, mars 1997. P 21.  
[http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/29/015/29015601.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/015/29015601.pdf)
  - 7 U.S. National Research Council, Committee on Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for improving Safety and Security at U.S. Nuclear Plants, Phase 2, the National Academies of Science, National Academies Press, Washington D.C. (2016).  
<https://www.nap.edu/catalog/21874/lessons-learned-from-the-fukushima-nuclear-accident-for-improving-safety-and-security-of-us-nuclear-plants>
  - 8 U.S. Nuclear Regulatory Commission, US Commercial Spent Nuclear Fuel Assembly Characteristics: 1968-2013, NUREG/CR-7227, 28 septembre 2016.  
<https://www.nrc.gov/docs/ML1626/ML16267A351.pdf>
  - 9 Robert Alvarez, Jan Beyea, Klaus Janberg, Jungmin Kang, Ed Lyman, Allison Macfarlane, Gordon Thompson, Frank N. von Hippel, Reducing the Hazards from Stored Spent Power-Reactor Fuel in the United States, Science and Global Security, 11:1-51 (2003).  
<https://www.nrc.gov/docs/ML1209/ML120960695.pdf>
  - 10 Frank N. von Hippel and Michael Schoeppner, Reducing the Danger from Fires in Spent Fuel Pools, Science and Global Security, Vol 24, No 3, 141-173.  
<http://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs24vonhippel.pdf>
  - 11 U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Security and Incidence Response, RASCAL 3.0.5 Descriptions of Models and Methods, NUREG-1887, août 2007.  
<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1887/sr1887.pdf>
  - 12 Containment, Independent Lens, PBS, janvier 2016,  
<http://www.pbs.org/independentlens/films/containment/>
  - 13 Op. cit. Réf. 9.
  - 14 Andrew C. Kadak, The Storage of Spent Nuclear Fuel, Managing Nuclear Waste, The Bridge, National Academy of Engineering, National Academies of Science, été 2012.  
<https://www.nae.edu/File.aspx?id=60739>
  - 15 U.S. Department of Energy, Nuclear Waste Technical Review Board, Letter to Mr. John Kotek, Acting Assistant Secretary for Nuclear Energy, from Rodney C. Ewing, Chairman, 23 mai 2016.  
<https://www.nwtrb.gov/docs/default-source/correspondence/rce0516.pdf?sfvrsn=15>
  - 16 Op. cit. Réf. 6.
  - 17 Ibid
  - 18 Ibid
  - 19 U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Task Order 11: Development of Consolidated Fuel Storage Facility Concepts Report, 12 février 2013.  
[https://curie.ornl.gov/system/files/documents/not%20yet%20assigned/AREVA%20-%20TO11%20-%20FINAL%20REPORT\\_0.pdf](https://curie.ornl.gov/system/files/documents/not%20yet%20assigned/AREVA%20-%20TO11%20-%20FINAL%20REPORT_0.pdf)
  - 20 DOE: J.Jarrell, Standardized Transportation, Aging, and Disposal (STAD) Canister Design, presentation to the Nuclear Waste Technical Review Board 24 juin 2015.  
<http://www.nwtrb.gov/meetings/2015/june/jarrell.pdf>

---

21 Op. cit. Réf. 19.

22 U.S. Department of Energy, Analysis of the Total System Life-Cycle Cost of Civilian Radioactive Waste Management Program, Fiscal Year 2007, DOE/RW-059, juillet 2008.  
<https://www.nrc.gov/docs/ML0927/ML092710177.pdf>

23 U.S. Department of Energy, Strategy for the Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste, janvier 2013.  
<http://www.energy.gov/sites/prod/files/Strategy%20for%20the%20Management%20and%20Disposal%20of%20Used%20Nuclear%20Fuel%20and%20High%20Level%20Radioactive%20Waste.pdf>

24 A. Machiels, An Updated Perspective on the US Nuclear Fuel Cycle, Electric Power Research Institute, Technical Update, juin 2006.  
<http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=00000000001013442>

25 International Atomic Energy Agency, Scientific and Technical Basis for geological disposal of Radioactive Wastes, Technical Reports Series, No. 413, (2003) p. 6.  
[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS413\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS413_web.pdf)

26 Volcanic Hazard At Proposed Yucca Mountain Nuclear Waste Repository Greater Than Previously Thought, Science News, août 2002.  
<https://www.sciencedaily.com/releases/2002/08/020801075418.htm>

27 U.S. Department Energy, License Application for a High-Level Waste Geologic Repository at Yucca Mountain, 3 juin 2008.  
<https://www.nrc.gov/waste/hlw-disposal/yucca-lic-app.html>

28 Ibid

29 Ibid

30 Somi Seong, Obaid Younossi, Benjamin W. Goldsmith, Titanium Industrial Base, Price Trends, and Technology Initiatives, The Rand Corporation, 2009.  
[https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monographs/2009/RAND\\_MG789.pdf](https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monographs/2009/RAND_MG789.pdf)

31 U.S. Department of Energy, Inventory and Description of Commercial Reactor Fuels within the United States, FCRD-Used, 2011-000093,  
<http://sti.srs.gov/fulltext/SRNL-STI-2011-00228.pdf>

32 Adam Levin, What to Expect When Ready to Move Spent Nuclear Fuel from Commercial Nuclear Power Plants, National Transportation Stakeholders Forum, Minneapolis, MN, 14 mai 2014.  
[https://curie.ornl.gov/content/what-expect-when-readying-move-spent-nuclear-fuel-commercial-nuclear-power-plants?search\\_api\\_views\\_fulltext=&page=3&curie\\_origin=solr](https://curie.ornl.gov/content/what-expect-when-readying-move-spent-nuclear-fuel-commercial-nuclear-power-plants?search_api_views_fulltext=&page=3&curie_origin=solr)

33 U.S. Government Accountability Office, COMMERCIAL NUCLEAR WASTE, Resuming Licensing of the Yucca Mountain Repository Would Require Rebuilding Capacity at DOE and NRC, Among Other Key Steps, GAO-17-340, 17 avril 2017. P.1,  
<https://www.gao.gov/assets/690/684327.pdf>