

État des lieux des projets d'enfouissement des déchets radioactifs.

Étude par pays.

Bernard Laponche

Octobre 2022


GLOBAL
CHANCE

Table des matières

INTRODUCTION 4

I. ÉTATS-UNIS 6

1. L'électronucléaire aux États-Unis 6
2. L'entreposage des combustibles irradiés 8
3. Les déboires du stockage géologique profond 11
4. À la recherche de sites sous le Gouvernement Biden 18

II. BELGIQUE 20

1. La gestion des combustibles et des déchets radioactifs en Belgique 20
2. Analyse critique 25
3. Annexe – Retraitement de combustibles irradiés belges à La Hague 29

III. SUISSE 30

1. La Suisse 30
2. L'électricité en Suisse 30
3. L'entreposage à sec centralisé des combustibles irradiés 33
4. Le projet de stockage géologique profond 35

IV. SUEDE 42

1. La Suède 42
2. L'électricité en Suède 43
3. L'entreposage centralisé 46
4. Les déchets de haute activité : le projet Forsmark 47
5. Des critiques 53
6. Une enquête sociologique 59

Conclusion 61

V. FINLANDE 62

1. La Finlande 62
2. Production et consommation d'électricité 63
3. Gestion des déchets nucléaires : organisation et institutions 65
4. Gestion des déchets de haute activité à vie longue 65
5. Le projet Onkalo 67
6. Démocratie et choix nucléaires 71

VI. AUTRES PAYS 75

1. Royaume-Uni 75
2. Chine 80
3. Allemagne 83
4. Japon 88

CONCLUSION 92

Introduction

À la fin des années 1930, une intense activité en physique nucléaire dans les pays occidentaux a abouti à la découverte de la radioactivité artificielle, de la structure du noyau des atomes et de la fission, conduisant à la conviction de l'énorme potentiel de l'utilisation de l'énergie nucléaire. La vérification expérimentale que l'enchaînement de la fission des noyaux d'uranium 235 et de la réaction en chaîne pouvait fonctionner fut réalisée le 2 décembre 1942 à l'Université de Chicago par Enrico Fermi.

Dès 1942 les Etats-Unis entrent dans la guerre contre le Japon dans le Pacifique et en Europe contre l'Allemagne. Le projet Manhattan est un effort colossal, mobilisant des centaines de milliers de personne, à la fois scientifique, technique et industriel, qui permet de mettre au point les grandes composantes de la fabrication de la bombe atomique : des mines d'uranium, des réacteurs nucléaires (à uranium naturel, graphite, gaz) pour produire du plutonium, des usines d'enrichissement pour produire à partir de l'uranium naturel de l'uranium 235 presque pur en uranium 235 (à 95 %). Ce programme gigantesque mené en moins de trois ans aboutit au lâcher d'une bombe à uranium sur Hiroshima et une au plutonium sur Nagasaki les 6 et 9 août 1945, faisant 214 000 morts. Le programme militaire continue ensuite aux Etats-Unis et en particulier avec la mise au point des moteurs de sous-marins atomiques qui nécessitent des réacteurs plus compacts à uranium enrichi et eau ordinaire. Les techniques de base de l'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production de chaleur puis d'électricité sont donc en place et les industriels ont acquis tous les moyens pour propager l'atome civil.

Les programmes civils sont lancés en 1953 par un grand discours du président Eisenhower « l'Atome pour la paix » et sont ensuite facilités par la loi « *Price Anderson Act* » de 1957 qui fixe un plafond de responsabilité de l'industrie privée (les compagnies d'électricité) en cas d'accident nucléaire, au-delà duquel les indemnisations seraient couvertes par le budget fédéral. Sans cette loi qui a ensuite donné naissance à des lois similaires dans la grande majorité des pays qui le développeront, le nucléaire civil n'aurait pas connu un grand essor.

Cette annonce fut suivie d'une offensive très agressive au niveau mondial des industriels américains, notamment Westinghouse et General Electric.

Pour en rester aux Etats-Unis, si la construction de centrales nucléaires s'est rapidement développée, le nucléaire civil, porté très majoritairement par des compagnies privées s'est développé indépendamment du programme militaire qui s'est poursuivi, notamment avec la « bombe à hydrogène » basée sur la fusion d'atomes légers.

Après 1945, le Royaume-Uni et la France se lancent également dans le développement du nucléaire militaire et du nucléaire civil avec la construction de réacteurs à uranium naturel graphite gaz, d'abord pour l'usage militaire puis pour des réacteurs nucléaires équipant des centrales de production d'électricité, avec le retraitement de leurs combustibles irradiés pour la production du plutonium, nécessaire à la construction de la bombe atomique, mais également pour alimenter des réacteurs à neutrons rapides utilisant le plutonium comme principal élément combustible, en vue de la surgénération. Tout en gardant un programme militaire, la France choisira à partir de 1970 de ne construire que des réacteurs électronucléaires de la filière à uranium enrichi et eau sous pression (PWR), tout en poursuivant son programme militaire.
L'Allemagne, interdite de nucléaire militaire se lance dans le nucléaire civil dès les années 1950 avec la construction de réacteurs des filières américaines. Il en est de même pour le Japon où l'offensive américaine « l'Atome pour la Paix » a réussi à s'imposer, paradoxalement. Interdits de production de plutonium ces deux pays font pendant un temps retraiter leur combustible irradié en Angleterre (BNFL) et en France (COGEMA).
D'autres pays occidentaux qui auraient pu le faire par leur propre compétence scientifique et industrielle, ne se lancent pas dans le nucléaire militaire : le Canada, la Suède, la Belgique, la Suisse.

On se trouve donc dans des situations diverses en ce qui concerne la gestion des combustibles irradiés et des déchets issus de toutes ces activités.

Nous n'abordons pas dans cette étude la question des déchets militaires, mais il faut comprendre que la priorité de l'effort militaire était telle que la gestion des déchets et des pollutions dans l'environnement n'intéressait alors personne : les exemples de Hanford aux Etats-Unis, de Sellafield en Angleterre et de Marcoule en France en sont l'exemple, par leur situation désastreuse.

Du côté du militaire civil, ce ne fut pas très différent : tous les efforts scientifiques, techniques et industriels ont porté sur les centrales nucléaires et les usines du combustible nucléaire. Sur la question des déchets radioactifs (et aussi d'ailleurs du démantèlement des installations), les réponses étaient simples : ou bien « on trouvera une solution, » ou bien, pour les déchets « on les mettra au fond de la mer ». A partir de 1946 et durant quatre décennies, plusieurs pays ont immergé des déchets sans les enfouir. Jusqu'en 1966, ce sont principalement le Royaume-Uni et la Belgique qui ont procédé à des rejets (environ 43 500 tonnes). De 1967 à 1983, les rejets étaient coordonnés par l'AEN[1].

Mais, les déchets s'accumulant, les différents pays ont fini par s'en inquiéter et du coup, par découvrir la complexité du problème.

L'objet de cette étude est de présenter quelques cas intéressants et significatifs de la difficulté de la gestion des déchets radioactifs en s'intéressant uniquement à la question des combustibles irradiés, issus des réacteurs électronucléaires, qui contiennent des produits de fission, du plutonium et des actinides mineurs[2] dont les niveaux de radioactivité et, pour certains, les durées de vie, sont de loin les plus importants en termes de risques de l'ensemble des déchets. Plus que sur les questions techniques dont l'exposé demanderait de plus amples développements et peuvent être retrouvées facilement sur chaque question particulière, nous nous sommes intéressés à deux aspects de la gestion des combustibles irradiés : la doctrine de gestion adoptée selon les pays et le processus de décision, notamment dans la prise en compte, ou non, de l'avis des citoyens.

Nous avons donc choisi quelques pays, or la France, dont les démarches nous ont paru les plus intéressantes pour analyser ces choix, de façon plus complète pour ceux qui nous paraissent les plus significatifs et certains autres de façon plus simple.

Ainsi les Chapitres I à V présentent la situation aux Etats-Unis en Belgique, en Suisse, en Suède et en Finlande. Au Chapitre VI sont présentés plus succinctement les cas du Royaume-Uni, de la Chine, de l'Allemagne, et du Japon.

1 AEN : Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE.

2 Actinides mineurs : éléments qui n'existent pas dans la nature et qui sont « créés » par des réactions nucléaires à l'intérieur des combustibles en même temps que les fissions et les réactions en chaîne.

I. États-Unis

1. L'électronucléaire aux États-Unis[3]

1.1 Les réacteurs

Au 1er juillet 2021, 93 réacteurs pour la production d'électricité étaient en fonctionnement d'un âge[4] entre 31 et 40 ans pour 46 d'entre eux et 41-50 ans pour 41. À la même date, le nombre de réacteurs de puissance arrêtés depuis 1963 était de 37, dont quelques-uns ont déjà été démantelés.

Seulement 2 réacteurs étaient (et sont toujours) en construction, avec de nombreuses difficultés : Vogtle 3 et 4 (PWR de 1117 MW de puissance électrique nette). En 2020, la puissance électrique nette du parc électronucléaire était de 93 000 MW[5] et sa production de 790 TWh[6].

Les deux filières dominantes sont les réacteurs à uranium enrichi, à eau sous pression (PWR) ou à eau bouillante (BWR) comme caloporteur et modérateur.

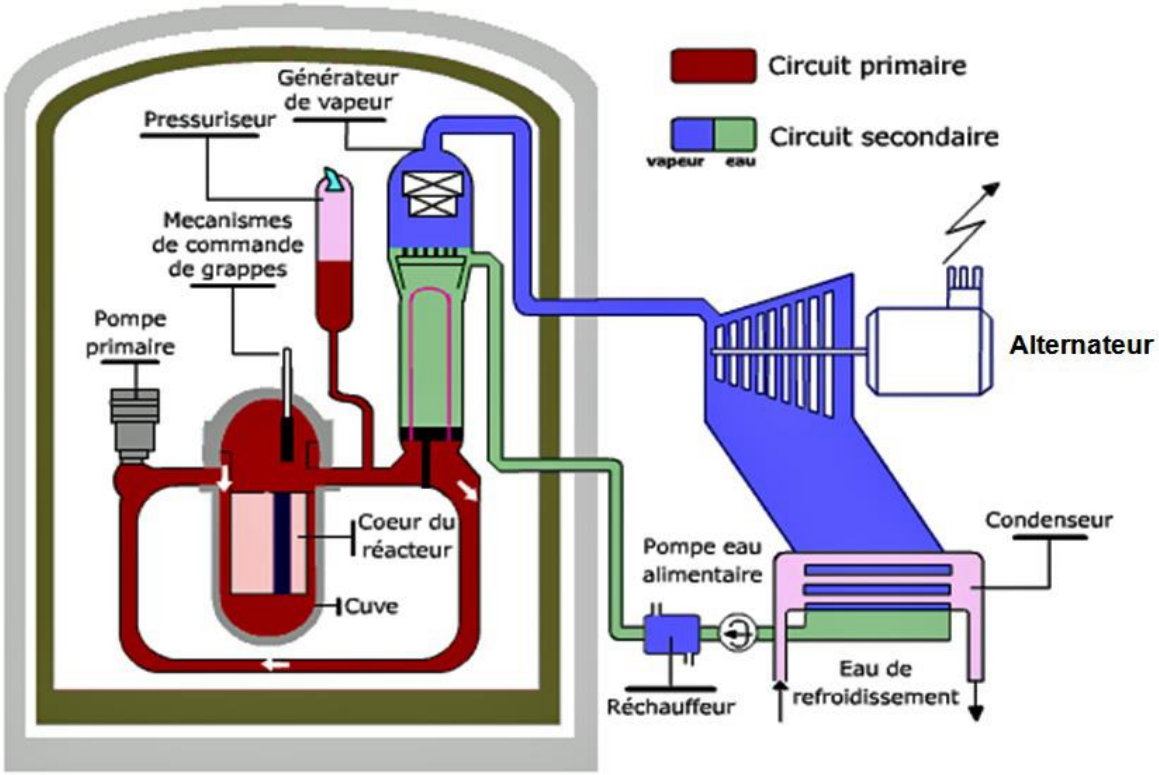


Figure 1 : Réacteur à eau sous pression (PWR ou REP)

[3] *World nuclear industry status report* (WNISR) 2021 : https://www.worldnuclearreport.org

[4] A partir de la date de la connexion au réseau électrique.

[5] MW : million de Watts. A comparer à 63 000 MW en France.

[6] TWh : TéraWattheure ou milliard de kWh.

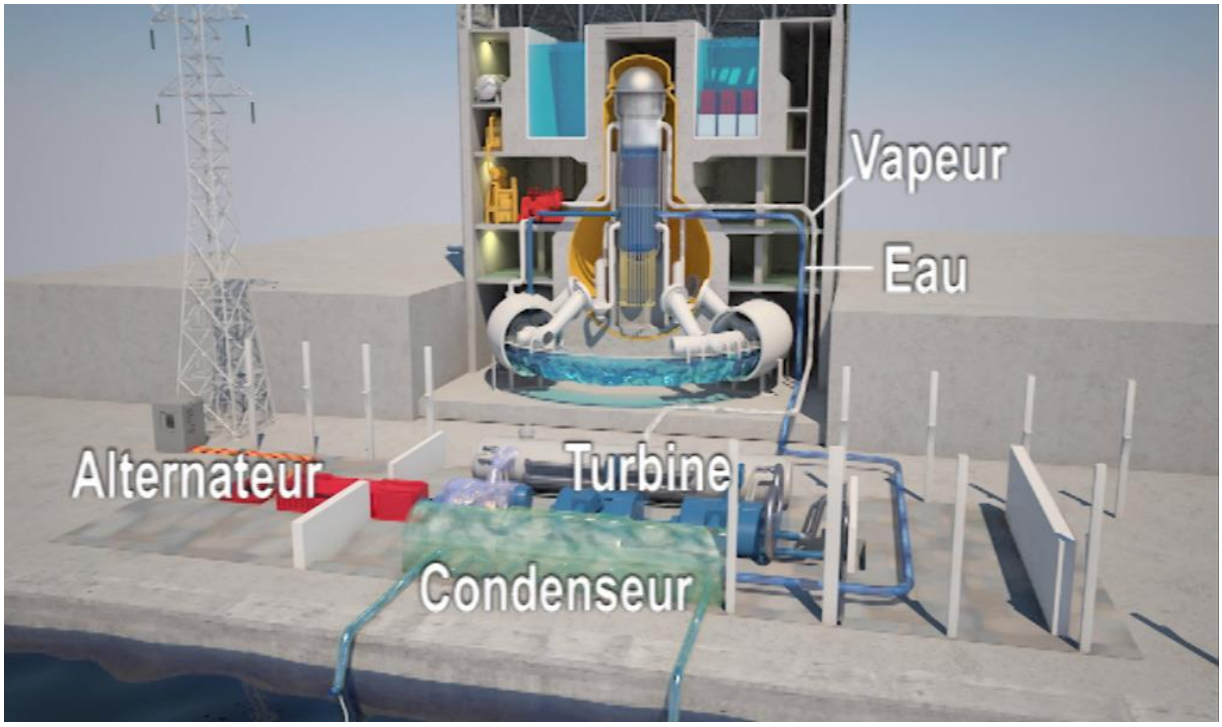


Figure 2 : Réacteur à eau bouillante (BWR)

1.2 Le combustible

Dans les deux variantes PWR et BWR, le combustible est constitué de pastilles d'oxyde d'uranium (UO_2) enrichi de 3 à 5%, empilées dans des tubes de zircaloy formant la gaine. La longueur de ces « crayons » de combustible est égale à la hauteur du cœur du réacteur (environ 4 m). Leur diamètre est d'environ 10 mm pour les PWR et 14 mm pour les BWR.

Ces crayons sont placés dans des boîtiers verticaux en zircaloy, de section carrée, constituant ainsi des « assemblages » contenant jusqu'à 264 crayons dans les PWR et 96 crayons dans les BWR. Dans un BWR, la structure de l'assemblage est fermée par un boîtier sur les quatre faces verticales.

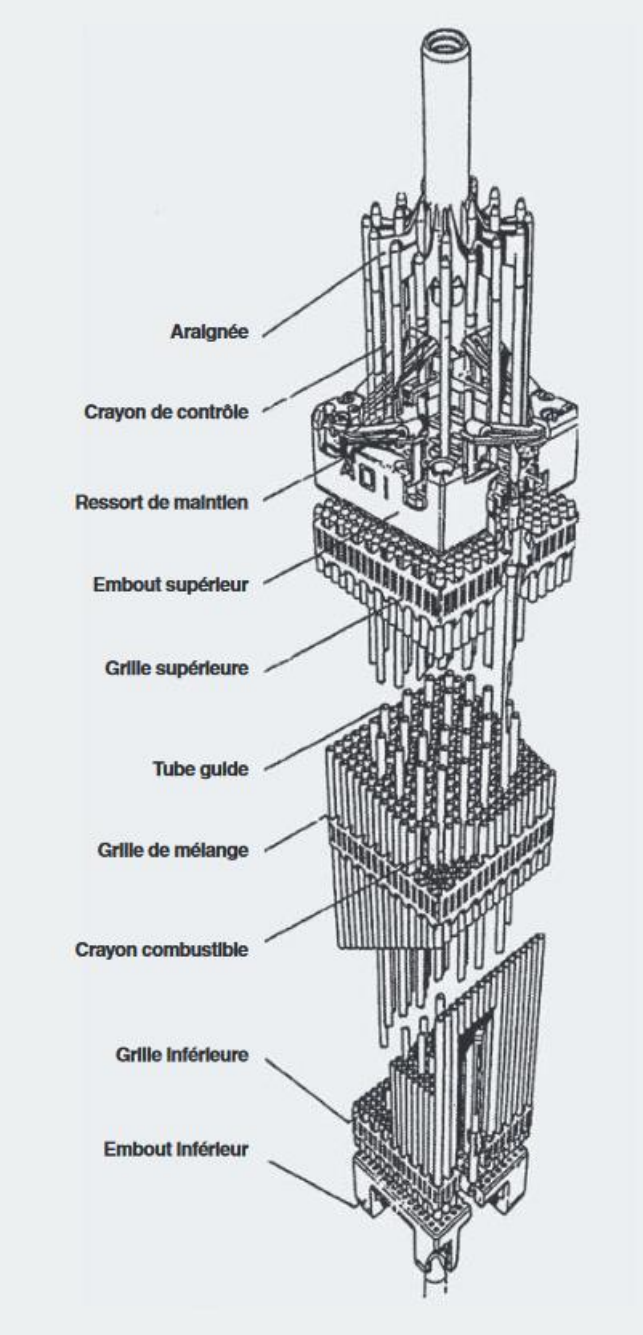


Figure 3 : Assemblage PWR

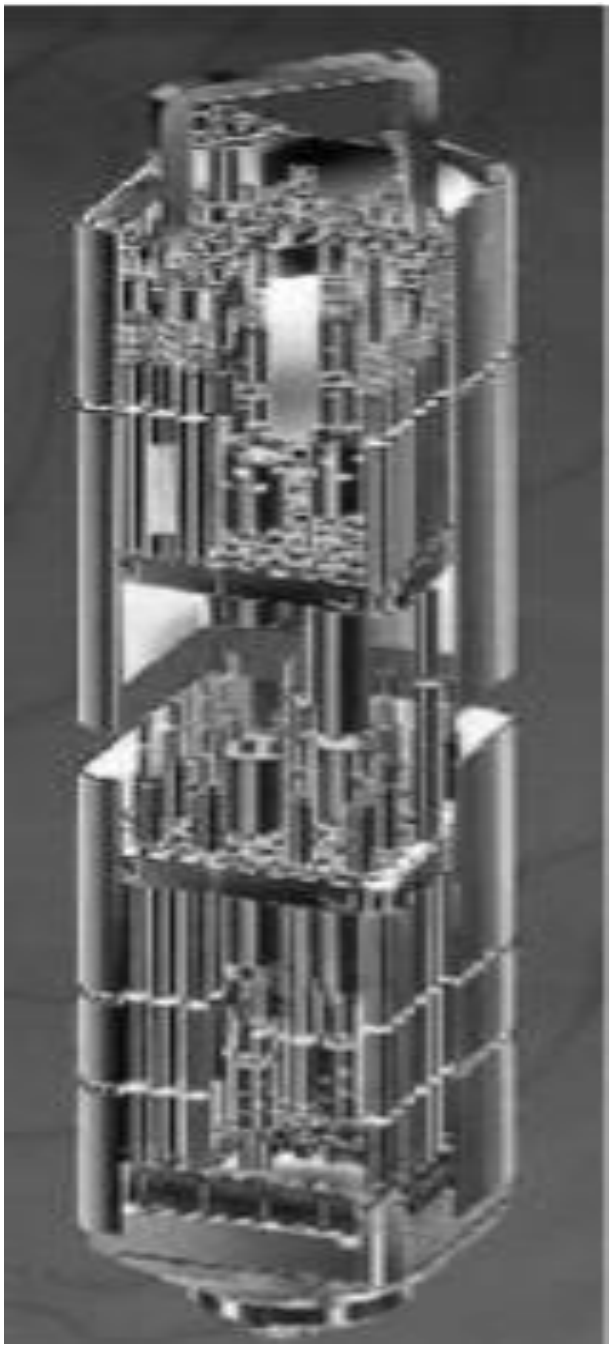


Figure 4 : Assemblage BWR

2. L'entreposage des combustibles irradiés

L'industrie électronucléaire des États-Unis ne pratique pas le retraitement des combustibles irradiés pour la production du plutonium. Les déchets de haute activité à vie longue sont donc les assemblages de combustibles irradiés après leur séjour dans le réacteur pendant lequel les fissions et la réaction en chaîne ainsi que d'autres réactions nucléaires ont produit du plutonium, des produits de fission et des actinides mineurs. Ils sont donc très radioactifs et très chauds. En

décembre 2021[7], il y avait 86 000 tonnes de combustible irradié entreposées dans 75 centrales nucléaires en fonctionnement ou arrêtées, dans 33 États.

Au stade actuel, la gestion des combustibles irradiés aux États-Unis consiste en une série d'entreposages de plus ou moins longue durée.

2.1 Entreposage en piscine du réacteur

Chaque réacteur est doté d'un « bâtiment combustible » accolé au réacteur, contenant un grand bassin d'eau, la « piscine », où sont entreposés les combustibles irradiés, sous plusieurs mètres d'eau pendant plusieurs années afin de faire décroître leur température (eau refroidie en permanence) et leur radioactivité.

Le transfert du cœur du réacteur à la piscine de l'assemblage irradié se fait entièrement sous eau : ouverture du couvercle de la cuve et extraction verticale de l'assemblage, mise à l'horizontale de celui-ci, ouverture d'un tuyau horizontal de passage à travers l'enceinte de confinement vers le bâtiment combustible, remis à la verticale de l'assemblage et dépôt dans la piscine. Le tuyau horizontal de transfert est évidemment scellé après l'opération et le retour au fonctionnement du réacteur. Cette solution ne peut pas durer trop longtemps car les piscines se remplissent à chaque renouvellement de combustible.

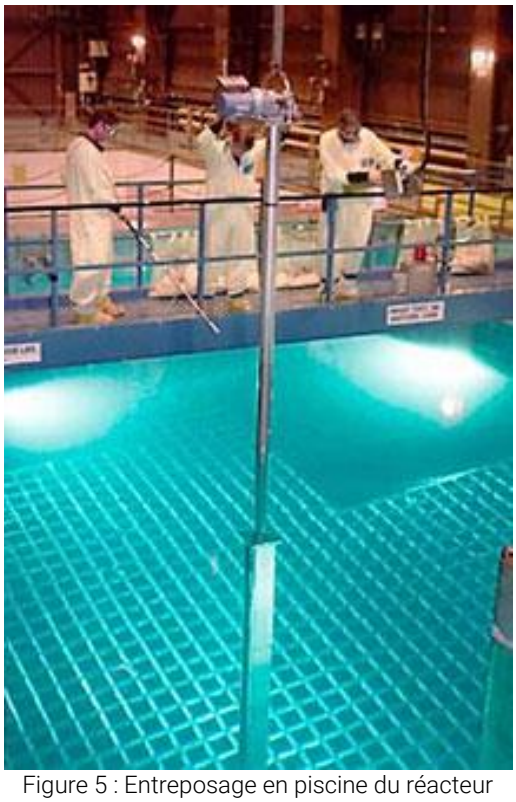


Figure 5 : Entreposage en piscine du réacteur

2.2 Entreposage à sec sur le site de la centrale

Une fois que la radioactivité et la température des combustibles irradiés ont suffisamment décru, les exploitants ont recours à l'entreposage à sec dans des conteneurs en acier de groupes d'assemblages, contenus eux-mêmes dans des conteneurs en béton déposés sur le site de la centrale. Toutes les centrales sont équipées de tels entreposages, y compris sur les quelques

[7] https://www.world-nuclear-news.org/Articles/USA-relaunches-used-fuel-management-programme

centrales totalement démantelées. Plusieurs systèmes sont utilisés. Ils sont garantis par les fournisseurs pour au moins cent ans.

L'intérêt de ces systèmes est qu'il est relativement facile de contrôler l'apparition de fuites nécessitant une intervention.



Figure 6 : Système d'entreposage NAC choisi pour Three Mile Island

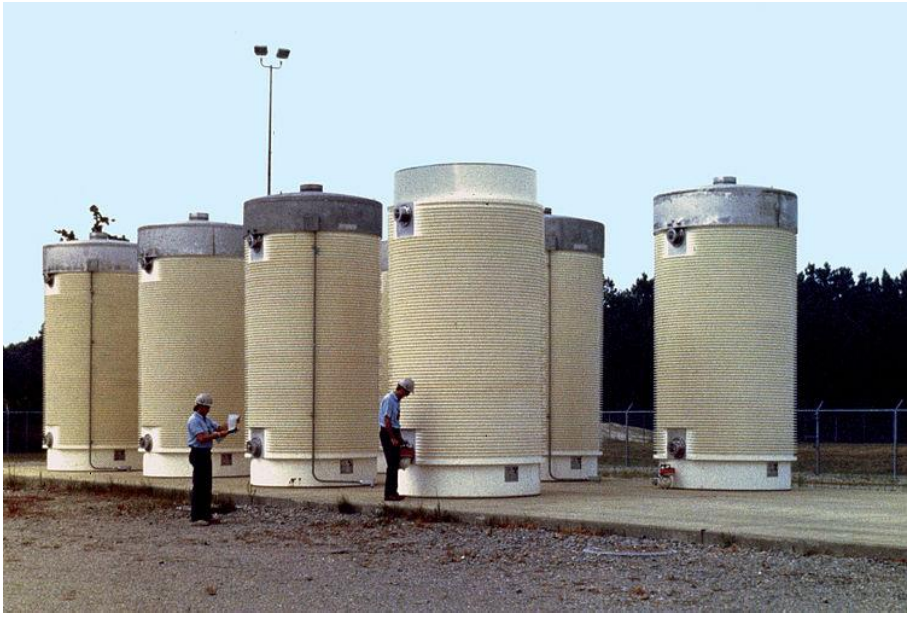


Figure 7 : Système Holtec



Figure 8 : Orano vend le système NUHOMS

2.3 Vers des entreposages centralisés

La situation actuelle est donc l'entreposage à sec sur chaque centrale, ce qui nécessite une surveillance, même sur des centrales arrêtées définitivement et parfois depuis longtemps.

Plusieurs projets sont à l'étude de création de plusieurs sites régionaux, au niveau des Etats par exemple, qui accueilleraient les conteneurs de plusieurs centrales, sans avoir, comme les sites de celles-ci, l'obligation d'un fleuve, d'une rivière ou du bord de mer pour son refroidissement. Des discussions sont en cours pour l'implantation par Holtec d'un tel centre dans l'État du Nouveau-Mexique (Carlsbad).

3. Les déboires du stockage géologique profond

Le stockage des combustibles irradiés, considéré comme définitif par opposition à l'entreposage, est régi par le « *Nuclear Policy Act* » (loi fédérale sur la politique nucléaire) de 1982. Cette loi fédérale décidait le stockage géologique profond pour les combustibles irradiés des centrales électronucléaires et les déchets de haute activité des activités militaires. L'amendement de 1987 sélectionnait le site de Yucca Mountain, dans l'État du Nevada, comme le site unique devant faire l'objet d'études de l'Autorité de sûreté nucléaire (NRC) et de l'Agence de protection de l'environnement. Et cela malgré l'opposition de l'État du Nevada. Le projet Yucca Mountain sera finalement un échec.

Parallèlement, a été construit et exploité le site de stockage géologique profond des déchets de haute activité à vie longue des installations nucléaires militaires : le projet WIPP (*Waste Isolation Pilot Project*).

3.1 Le site de Yucca Mountain

Un choix très politique

D'après Allison Macfarlane, ancienne présidente de l'autorité de sûreté nucléaire (NRC) et spécialiste des questions de déchets nucléaires, l'histoire du site de Yucca Mountain est très politique. Dans son article du 21 février 2020 du « *Bulletin of atomic scientists* », elle écrit :

« Une impasse permanente. Yucca Mountain a passé une grande partie de son existence à être un ballon de football politique. La loi initiale de 1982 sur la politique en matière de déchets nucléaires

exigeait une caractérisation détaillée de trois sites de stockage potentiels pour l'élimination du combustible nucléaire commercial usé et des déchets hautement radioactifs du complexe d'armes nucléaires. En 1986, il était clair que les travaux sur ces trois sites seraient très coûteux, et le Congrès s'est montré réticent devant le prix à payer.

Des querelles politiques s'ensuivirent, et ce n'est pas un hasard si, parmi les trois Etats envisagés – le Nevada, le Texas et l'Etat de Washington -, celui dont la délégation au Congrès était la plus jeune, y compris le sénateur Harry Reid nouvellement élu, fut choisi comme seul site à être caractérisé par le Département de l'énergie comme convenant à un dépôt.

Par la suite, l'affectation de fonds pour les travaux sur Yucca Mountain a été constamment soumise aux caprices politiques du Congrès. Le sénateur Reid, par exemple, a bloqué à plusieurs reprises le financement de Yucca Mountain après son approbation par la Chambre des représentants. Et un vieil adage parmi les experts américains en matière de déchets nucléaires veut que rien ne se passe jamais en matière de déchets nucléaires pendant une année électorale.

Pour l'instant, aucune des personnes impliquées dans le processus n'a intérêt à progresser. Une Chambre et un Sénat extrêmement partisans sont dans une impasse permanente sur une question qui a peu d'incidence sur les chances de réélection (sauf dans le Nevada). L'industrie nucléaire a découvert qu'elle pouvait construire de nouveaux réacteurs – les deux unités Westinghouse AP1000 en construction en Géorgie – sans résoudre le problème du combustible usé. Le département de l'Énergie, initialement chargé de résoudre le problème, n'a pas l'autorité légale (ni les crédits) pour aller de l'avant. La Commission de réglementation nucléaire, qui a adopté une règle de stockage continu en 2014, a annulé sa capacité à imposer une solution. Et de nombreux groupes d'intérêt antinucléaires qui s'opposent au transport des déchets et aux dépôts ont appelé à un « stockage consolidé sur site ».

Ajoutons que l'Etat du Nevada s'est opposé au projet (mauvaise image pour Las Vegas) mais aussi que de nombreux groupes locaux s'y sont opposés, dont les indiens Shoshones.

Quelques éléments techniques et décisionnels

Yucca Mountain est une montagne située dans le comté de Nye (État du Nevada), parmi les montagnes arides du désert de Mohave, à environ 120 km au Nord-ouest de Las Vegas. Elle est composée de roches volcaniques (essentiellement du tuf[8]), éjectées par un volcan actuellement éteint. La montagne est le lieu du projet de stockage des déchets nucléaires de haute activité. Le lieu de stockage serait situé à 350 m au-dessous du sol et à même distance de la nappe phréatique.

La phase expérimentale de 1997 à 2008 a consisté à creuser un tunnel de 8 km de long et 8 m de diamètre équipé de niches et un second tunnel de 2,7 km de long et 5 m de diamètre, ainsi qu'une soixantaine de puits en surface, afin d'effectuer des expériences de caractérisation de la couche géologique (géologie, hydrogéologie, géochimie).

En 2005, le Département de l'Énergie (DOE) prévoyait encore que la future installation puisse démarre en 2012. En 2006, le Secrétaire d'État à l'énergie a admis que le budget initial prévu (60 milliards de dollars) serait certainement insuffisant. En mai 2007, une nouvelle carte géologique a été montrée au DOE qui indique que la faille sismique « *Bow Ridge* » qui traverse la chaîne Yucca Mountain, se trouve en réalité bien plus à l'Est que précédemment estimé, exactement sous l'endroit destiné à recevoir les déchets radioactifs. Bien que le DOE ait demandé en 2008 à la NRC l'autorisation de construction du site de stockage, le gouvernement de Barack Obama a retiré cette demande d'autorisation, a supprimé le « Bureau de gestion des déchets nucléaires civils » et l'a remplacé par une Commission (« *Blue Ribbon Commission on America's future* ») chargée d'élaborer la stratégie de gestion des déchets civils de haute activité.

[8] Tuf : roche poreuse légère formée de cendres volcaniques cimentées.

La Commission, dont faisait partie Allison Macfarlane, a remis son rapport en 2012, optant pour un stockage géologique profond et recommandant une politique de consultation et de débat ouvert et inclusif afin d'aboutir à une solution basée sur le consentement. On en est là, alors que se poursuit la politique d'entreposage à sec sécurisé que nous avons décrite ci-dessus.



Figure 9 : Forage à Yucca Mountain, 2013



Figure 10 : Ce qui reste de Yucca Mountain

3.2 Le stockage WIPP

L'installation[9]

L'installation (WIPP : Waste Isolation Pilot Plant) appartient au Département de l'Énergie des États-Unis (DOE) ; elle se trouve à 42 km de la ville de Carlsbad, au sud-est de l'Etat du Nouveau-Mexique. Environ 12 km d'excavations ont été réalisés à 655 mètres de profondeur dans une couche de sel.

Le WIPP a été conçu pour stocker environ 176 000 m3 de déchets radioactifs transuraniens (TRU) provenant des installations consacrées aux activités du programme nucléaire militaire américain, dont le laboratoire de Los Alamos et accumulés depuis les années 1930, soit 850 000 colis. Ces déchets se composent de vêtements, d'outils, de chiffons, de résidus, de débris, de terre et d'autres articles contaminés par de petites quantités de plutonium et d'autres éléments radioactifs artificiels. Les premiers colis de déchets y ont été stockés en 1999. La phase de stockage du WIPP est prévue pour durer 25 ans, suivie d'une période de fermeture d'une dizaine d'années.

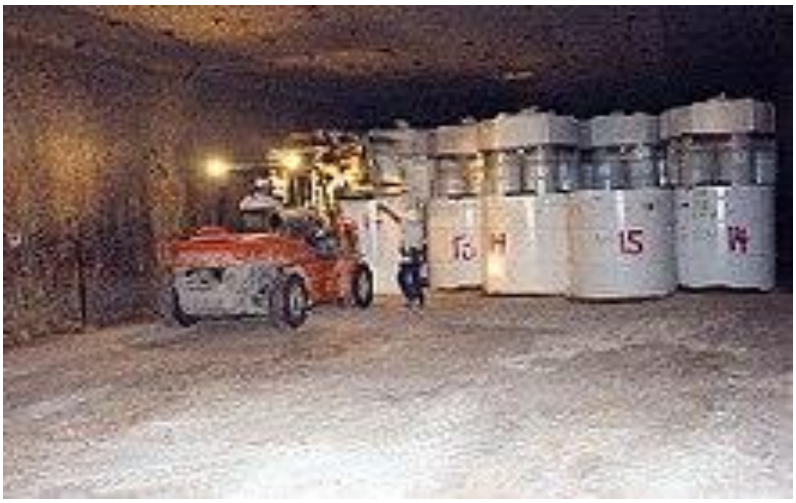


Figure 11 : Stockage des déchets à l'intérieur du WIPP

9 https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Pages/20210329_Etude-pluraliste-des-accidents-intervenus-en-2014-au-WIPP.aspx/

Les accidents de 2014[10]

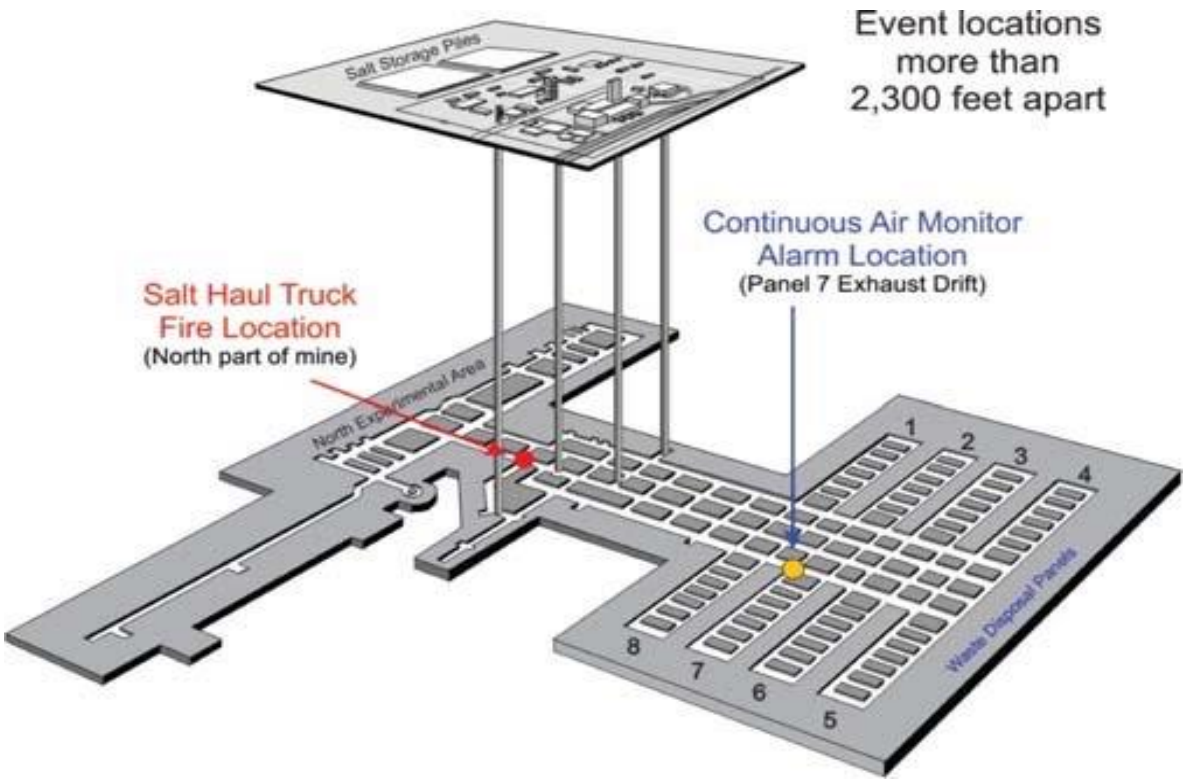


Figure 12 : Schéma d'ensemble du WIPP[11]

En rouge : lieu de l'incendie (partie nord, zone d'expérimentations). En jaune : localisation de la balise qui s'est déclenchée le 14 février 2014

Deux accidents se succèdent dans l'installation souterraine du WIPP en février 2014 : incendie d'un véhicule le 5, puis, le 14, explosion d'un colis de déchets non-conforme. Un relâchement de matières radioactives est constaté lors du deuxième accident par les stations de surveillance situées à la surface en tête des puits : le marquage de l'environnement s'est révélé négligeable de même que la contamination d'une vingtaine d'employés présents en surface (aucun personnel n'était présent dans les galeries, l'exploitation étant suspendue pour investigation depuis l'incendie). Conséquence de la contamination souterraine (et notamment celle du puits de sortie d'air), le débit d'air a été réduit et certaines opérations de maintenance des parois des galeries ont dû être différées. Après décontamination et mise en place d'une ventilation additionnelle l'exploitation a pu, début 2017, reprendre en mode ralenti (stockage et maintenance), mais ce n'est qu'avec le creusement et la mise en service d'un nouveau puits de ventilation, prévu en 2022, que l'installation pourra reprendre son activité nominale d'avant les accidents.

Une analyse très complète des accidents du WIPP de février 2014 a été réalisée en France par une étude conjointe de deux experts indépendants Jean-Dominique Boutin, citoyen, géographe, Laura Gratton, citoyenne, ingénieure indépendante, et l'IRSN (référence : note de bas de page n°7).

Le chapitre 2 de cette étude expose le déroulement des accidents des 5 et 14 février 2014.

« 5 février : un incendie de véhicule dans l'installation souterraine

Le matin du 5 février, vers 10h45, le véhicule de transport de sel convoie du sel excavé depuis la zone n°8 en cours de creusement vers le puits dédié à la gestion du sel (figure ci-dessus). Le chauffeur repère un départ de feu sous son véhicule. Il coupe le moteur, essaye en vain d'éteindre l'incendie avec son extincteur puis appelle le centre de contrôle.

[10] Source : IRSN, https://www.irsn.fr/.../Documents/IRSN_NI_Incidents-WIPP_20140314.pdf · Fichier PDF

[11] www.wipp.energy.gov/special.html

L'opérateur du centre de contrôle (SMRO), à la surface, enclenche l'alarme d'évacuation vers le puits d'amenée des déchets (86 personnes alors en zone souterraine). Du fait d'une fausse manœuvre les fumées se répandent dans l'installation souterraine. Les livraisons de déchets ainsi que tout travail dans l'installation souterraine sont suspendus et une enquête est réalisée. Sont mis en cause :

- défaut de maintenance du camion ;

- non-formation du chauffeur ;

- entreposage non rigoureux d'équipements (pneus, matériaux de construction) dans les galeries ;

- dispositif défaillant de lutte contre l'incendie ;

- mauvaise gestion de la ventilation (portes-cloison bloquées en position ouverte) ;

- désorganisation de l'évacuation (système d'alarme insuffisant) ;

- mauvaise communication interne pour l'évacuation ;

- insuffisante prise en compte du risque d'incendie ;

- défaut de formation et d'entraînement aux situations d'urgence.

14 février : un relâchement de radioactivité

Le 14 février vers 23h13, une balise à l'entrée d'une des zones souterraines indique un niveau de radioactivité dans l'installation souterraine. 11 personnes sont présentes à la surface. Le système central de surveillance déclenche le basculement de la ventilation en mode filtration.

Entre 6h et 7h le 15 février, les 11 employés de nuit partent du WIPP, sans vérification de leur absence de contamination et les 153 employés en poste de jour se présentent pour travailler (uniquement à la surface compte tenu de l'enquête sur l'incendie dans le souterrain du 5 février).

Remarque : Cette dernière précision est très importante. On peut imaginer l'impact sur les travailleurs si d'émission de produits radioactifs s'était produite une journée normale et sans la contrainte de non-travail au fond due à l'incendie du 5 février.

A partir de là et pendant la matinée du 15 février :

- détection sur les filtres d'une contamination alpha (présence de transuraniens en provenance d'un ou plusieurs colis de déchets stockés ;

- forte probabilité d'une importante activité rejetée à l'extérieur ;

- confinement du personnel sur place et leur mise à l'abri ;

- détection de la présence de plutonium 239/240 et d'américium 241 ;

- les puits de prise d'air extérieur et le puits de gestion du sel sont scellés.

Le 16 février, à partir de 19h, la situation d'urgence est levée.

Le bilan du personnel contaminé fait état de 22 employés du WIPP contaminés à un niveau inférieur à 0,1 mSv[12].

[12] mSzv : millisievert.

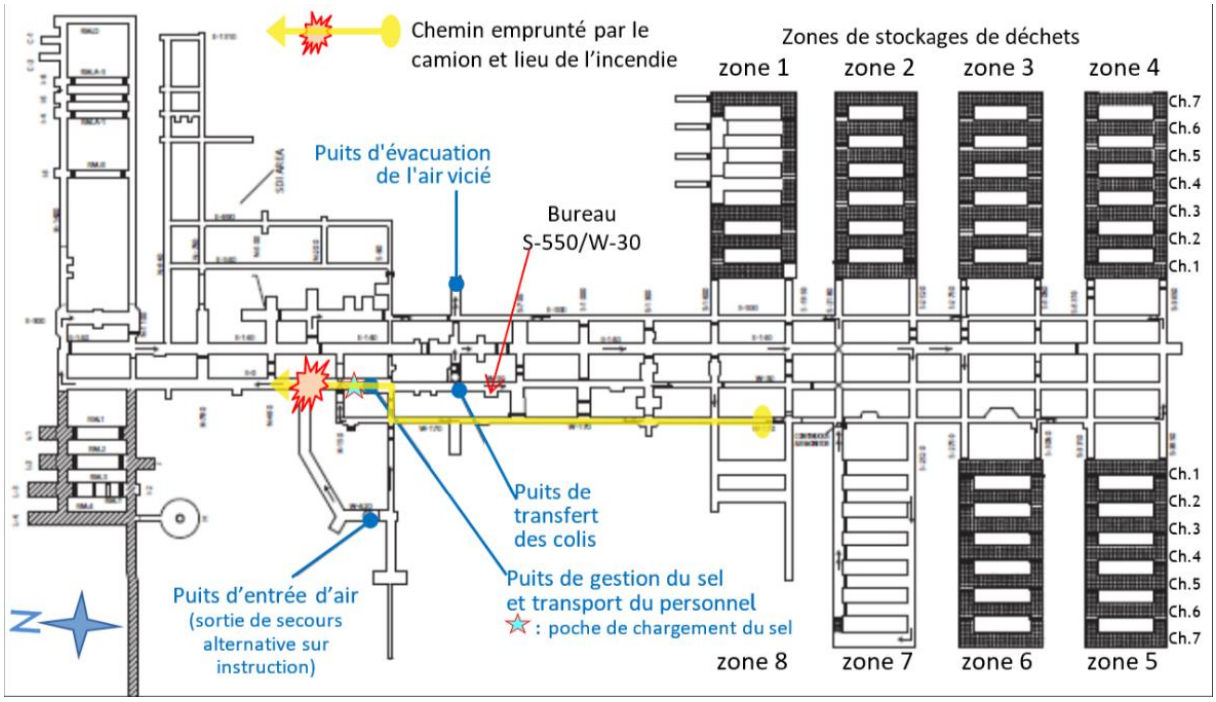


Figure 13 : L'accident de WIPP du 14 février 2014

La cause de l'accident

Une série de réactions chimiques exothermiques entre les matériaux stockés dans le colis aurait induit un emballement thermique menant à un rejet de matériaux solides et de gaz chauffés et, conséquemment, à un relâchement de radioactivité.

Le colis a expulsé un mélange de gaz issus de la décomposition de matière à très haute température (1500 °C) et de particules fines et combustibles. Au sortir du colis, ce mélange s'est enflammé, causant un incendie dans la chambre où le colis était stocké.

Basé sur les photographies prises à partir de mi-mai 2014, le colis au couvercle partiellement ouvert provenait de Los Alamos (LANL : centre de recherches militaire) est identifié dans la chambre 7 de la zone 7 (n° 68660).



Figure 19 : Photographie du colis 68660
(Rangée 16, colonne 4, cf.Figure 21) prise le 22 mai 2014 (source DOE [34])

Figure 14 : Le colis accidenté

« Le problème est dû à un matériau - une véritable litière pour chat - utilisé pour éponger les liquides dans les fûts scellés. Les responsables du laboratoire avaient décidé de substituer un matériau organique à un matériau minéral. Mais le nouveau matériau a provoqué une réaction chimique complexe qui a fait sauter le couvercle d'un baril, envoyant des monticules de mousse blanche et radioactive dans l'air et contaminant 35 % de la zone souterraine »[13].

« L'explosion se classe parmi les accidents nucléaires les plus coûteux de l'histoire des États-Unis, selon une analyse du Times. Le coût à long terme de l'accident pourrait dépasser les 2 milliards de dollars, un montant comparable au nettoyage effectué après la fusion partielle de 1979 à la centrale nucléaire de Three Mile Island en Pennsylvanie ».

« Le coût direct du nettoyage s'élève désormais à 640 millions de dollars (août 2016), sur la base d'une modification de contrat effectuée le mois dernier avec Nuclear Waste Partnership, qui a fait passer le coût de 1,3 à près de 2 milliards de dollars. Le contrat à prix coûtant majoré laisse entrevoir la possibilité de coûts encore plus élevés au fur et à mesure des réparations. Et il n'inclut pas le remplacement complet du système de ventilation contaminé ni les coûts futurs liés à l'exploitation de la mine plus longtemps que prévu ».

L'étude conjointe en référence analyse avec précision les défaillances de sûreté au WIPP et au Laboratoire de Los Alamos (LANL).

4. À la recherche de sites sous le Gouvernement Biden

Reuters, 30 novembre 2021[14]

« L'administration Biden a déclaré mardi qu'elle recherchait des communautés locales désireuses d'accueillir des sites de stockage de déchets nucléaires, arguant qu'ils sont nécessaires pour traiter les déchets existants du pays et encourager la croissance de l'énergie nucléaire pratiquement sans émissions pour lutter contre le changement climatique. Le gouvernement américain a essayé pendant des décennies de créer une décharge de déchets nucléaires à grande échelle à Yucca Mountain, dans le Nevada, pour stocker les déchets qui s'accumulent sur les sites des réacteurs, mais le projet a finalement été rejeté en raison des préoccupations du public concernant la sécurité.

L'énergie nucléaire est essentielle pour atteindre les objectifs de l'administration visant à créer un secteur électrique sans pollution par le carbone d'ici 2035 et une économie à émissions nettes nulles d'ici 2050", a déclaré le ministère de l'Énergie dans un communiqué de presse annonçant cet effort. »

Kathryn Huff, secrétaire adjointe principale du Département de l'Energie pour l'énergie nucléaire, a déclaré que l'accueil de tels sites pourrait apporter aux communautés des emplois et de nouvelles infrastructures et qu'elle s'attendait à des "milliers de réponses" à la demande d'informations.

« Le DOE s'est engagé à gérer de manière responsable le combustible nucléaire usé de la nation et les communautés qui le souhaitent ont le droit d'explorer les avantages et les conditions dont elles ont besoin pour accueillir une installation fédérale de stockage provisoire », a-t-elle déclaré.

---

[13] Los Angeles Times, 22 août 2016.

[14] https://www.reuters.com/markets/commodities/biden-renews-hunt-willing-hosts-nuclear-waste-storage-sites-2021-11-30/

« La gestion des déchets ne fait pas seulement du nucléaire une option plus durable, elle aide également le DOE à remplir son obligation de gérer le combustible nucléaire usé du pays », a-t-elle ajouté.

Le DOE a déclaré qu'il publiait une « demande d'informations sur un processus de sélection des sites basé sur le consentement" qui serait utilisé pour identifier les sites.

Un document très complet du Centre pour une politique énergétique globale (Center of Global Energy Policy) de l'Université de Columbia (New-York) présente de façon très détaillée des propositions au Gouvernement et au Sénat[15].

Son Introduction :

Au 117e Congrès[16], le Sénat des États-Unis est divisé à parts égales, 50-50, entre les deux principaux partis politiques, et la marge pour le contrôle de la Chambre des représentants est faible. Le programme américain de gestion des déchets nucléaires est une question politique non partisane - et excessive - sur laquelle le Congrès et l'exécutif pourraient se concentrer. Les États-Unis versent actuellement des milliards aux compagnies d'électricité pour qu'elles stockent le combustible nucléaire usé (SNF) dans les installations en exploitation et à l'arrêt, et les déchets de haute activité (HLW) restent sur les anciens sites de complexes d'armes nucléaires dans tout le pays. Si l'on ajoute à cela le potentiel d'une plus grande dépendance future à l'égard de l'énergie nucléaire dans une économie en voie de décarbonation, la nécessité de s'attaquer enfin à la gestion des déchets radioactifs est évidente.

Un rapport antérieur du Center on Global Energy Policy sur le programme américain de gestion des déchets nucléaires a examiné les changements structurels plus importants que le gouvernement fédéral pourrait mettre en œuvre pour aider le programme à progresser, comme la fixation du mécanisme de financement et la mise à jour des normes réglementaires. Ce commentaire examine le programme américain tel qu'il se présente au 117e Congrès et propose une série d'actions comparativement plus petites qui pourraient être envisagées et peut-être mises en œuvre sur une base bipartisane au cours des prochaines années.

Sa Conclusion :

La gestion des déchets nucléaires américains n'est pas une question démocrate ou républicaines. Les États dotés de centrales nucléaires sont passés du bleu au rouge[17] lors des élections de 2020. L'Idaho, la Caroline du Sud et Washington ont des environnements politiques différents, mais tous ont des déchets de haute activité (HLW) générés par la défense sur des sites du DOE qui ont besoin d'une filière d'élimination. Les dizaines de milliards de dollars d'impôts fédéraux dus à la rupture des contrats avec les compagnies d'électricité pour ne pas avoir respecté la nécessité d'un dépôt géologique pour accueillir leurs déchets, affectent les contribuables républicains et démocrates.

En outre, avec l'objectif de l'administration Biden de réduire à zéro les émissions de gaz à effet de serre des États-Unis d'ici 2050 et l'augmentation des fonds publics consacrés à la R&D sur les réacteurs nucléaires avancés, les efforts de décarbonation qui impliquent l'énergie nucléaire ne feront que renforcer la nécessité de s'occuper de l'élimination des déchets nucléaires. Les actions suggérées dans ce rapport pourraient aider le 117e Congrès et l'administration Biden à faire les premiers pas vers la restructuration du programme américain de gestion des déchets nucléaires, une question opportune et non partisane qui demande de l'attention.

---

[15] https://www.energypolicy.columbia.edu/research/commentary/nuclear-waste-policy-actions-117th-congress-and-biden-administration

[16] Depuis sa création.

[17] Les « bleu » sont les Démocrates et les « rouge » les Républicains

II. Belgique

La Belgique a une superficie de 30 688 km^2 et 11,5 millions d'habitants. C'est une monarchie constitutionnelle fédérale à régime parlementaire. Elle rassemble trois régions : Flandre, Wallonie, Bruxelles-Capitale. Et connaît deux groupes linguistiques : francophones (Communauté française) et néerlandophones (Communauté flamande).



1. La gestion des combustibles et des déchets radioactifs en Belgique[18]

La Belgique a une longue expérience en matière de fabrication d'éléments combustibles, de retraitement des combustibles irradiés, de conditionnement des déchets et de recyclage des matières nucléaires (uranium et plutonium) issues du pilote de retraitement réalisé par la société Eurochemic, créée en 1957 par un consortium composé de 13 Etats membres de l'OCDE (dont la France) et de partenaires privés. Depuis son lancement en 1966 jusqu'à la fin de ses activités de retraitement en 1975, Eurochemic a traité un total de 180 tonnes, un tonnage modeste, mais portant sur une grande variété d'éléments combustibles irradiés, et en a extrait 680 kg de plutonium. Eurochemic a également retraité 30,5 tonnes de combustible à uranium hautement enrichi, provenant de plusieurs réacteurs de recherche européenne.

1.1 Organisation du nucléaire en Belgique

Les activités du cycle du combustible nucléaire de puissance, sont gérées en Belgique par Synatom, qui n'est pas un opérateur industriel, mais une société qui assure l'amont et l'aval du

[18] Extraits de l'article « Retraitement des combustibles belges à La Hague et gestion des combustibles et des déchets radioactifs en Belgique ». Jean-Claude Zerbib, mars 2017. http://www.global-chance.org/Retraitement-des-combustibles-belges-a-La-Hague-et-gestion-des-combustibles-et-des-dechets-radioactifs-en-Belgique

cycle du combustible nucléaire en Belgique. Synatom constitue ainsi les provisions de matières nucléaires, jusqu'à l'uranium enrichi, qu'elle confie à "Electrabel", la société qui va fabriquer le combustible et gérer les réacteurs puis le combustible usé qui sera déchargé dans ses piscines.

La Belgique a déjà confié à la France, dans les années 70, le retraitement de plus de 600 tonnes de combustibles irradiés dans des réacteurs de puissance

Quand Electrabel l'aura décidé, après avoir encapsulé, ou non, les assemblages déchargés de ses réacteurs, Synatom interviendra de nouveau pour remettre à l'ONDRAF[19] ces combustibles irradiés actuellement entreposés, à sec à Doel et dans une piscine centralisée, à Tihange. Ces entreposages sont assurés par Belgoprocess[20], filiale de l'ONDRAF, avant le retraitement éventuel à La Hague d'une fraction des combustibles irradiés et d'un stockage final en l'état des autres combustibles, avec les déchets de haute et moyenne activité à vie longue. La Belgique a déjà confié à la France, dans les années 70, le retraitement de plus de 600 tonnes de combustibles irradiés dans des réacteurs de puissance (voir Annexe).

Un Programme National de gestion des combustibles irradiés et des déchets a été rendu public le 15 juillet 2016 sur lequel l'AFCN, Autorité fédérale de contrôle nucléaire, a remis un avis préalable.

1.2 Les combustibles irradiés entreposés en Belgique

La Belgique dispose de sept réacteurs de la filière PWR, mis en service entre 1975 et 1985 : quatre dans la centrale de Doel (2 réacteurs de 430 MW de puissance électrique nette et 2 autres de 1006 et 1036 MW) et trois à Tihange (962, 1008 et 1046 MW) soit une puissance électrique nette globale de 5 918 MW.

Il y a donc 5 réacteurs de puissance électrique nette voisine de 1000 MW qui déchargent annuellement des quantités voisines de combustibles irradiés et 2 réacteurs de 430 MW pour lesquels les tonnages d'assemblages irradiés sont inferieurs à ceux d'un seul réacteur de puissance de 1000 MW.

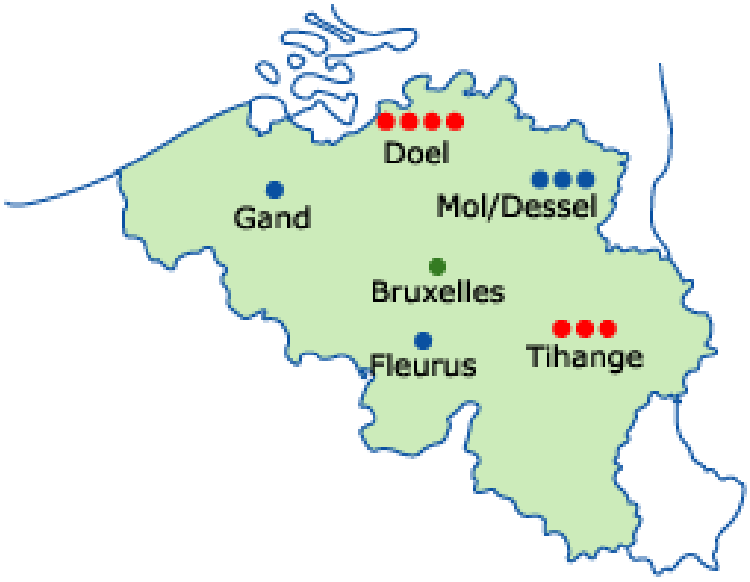


Figure 15 : Les centrales nucléaires en Belgique

[19] ONDRAF : organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies, créé par la loi belge du 8 août 1980, est l'organisme public qui est, sous la tutelle du Gouvernement fédéral, responsable de la gestion des déchets radioactifs en Belgique.

[20] Depuis 1986, Belgoprocess20 est une filiale de l'ONDRAF, responsable du traitement et de l'entreposage des déchets radioactifs issus avant leur stockage définitif par l'ONDRAF, des hôpitaux, des laboratoires, des centrales nucléaires, du secteur industriel, et des opérations de démantèlement.

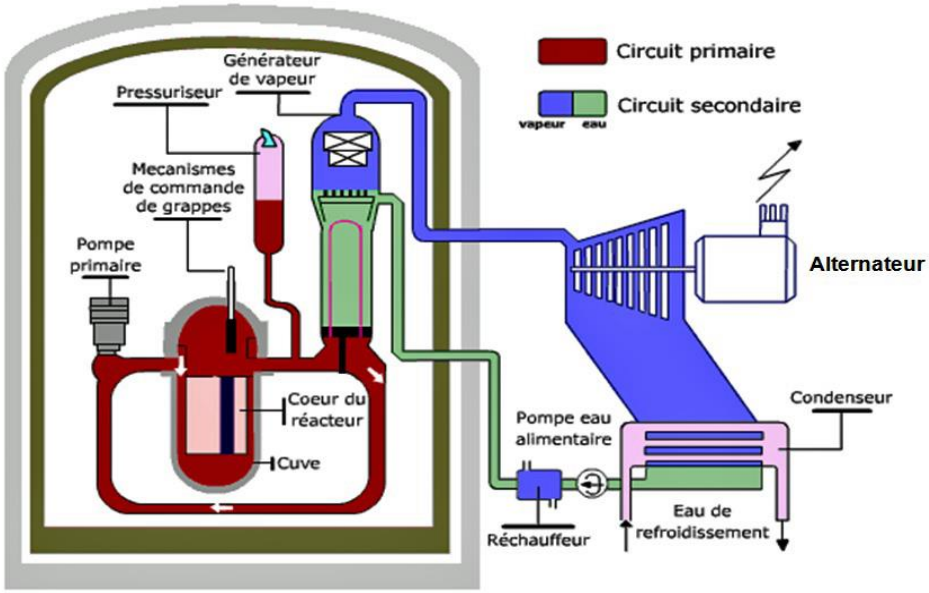


Figure 16 : Réacteur à eau sous pression (PWR ou REP)



Figure 17 : La centrale nucléaire de Tihange

En moyenne, 120 tonnes de combustible irradié sont déchargées annuellement de l'ensemble des sept réacteurs nucléaires en Belgique. Fin 2016, 10 027 assemblages avaient été déchargés, correspondant à 4 226 tonnes de combustibles (dont les 671 tonnes retraitées à La Hague, soit 2011 assemblages). Il y avait dans les entreposages *en piscine* de Tihange, et *à sec* de Doel, 8031 assemblages (respectivement 3 797 et 4 219).

Avec les matières nucléaires résultant du retraitement des 631 tonnes de combustibles irradiés, la Belgique a réalisé 77 tonnes de combustible URE (290 assemblages) et 66 tonnes de MOX[21] (4,8 t de plutonium dans 144 assemblages).

Une partie des assemblages déchargés se trouve dans les piscines des réacteurs mais la plus grande partie est entreposée en deux endroits centralisés :

- Dans une piscine d'entreposage, d'une capacité maximale de 3 720 emplacements, construite en 1997 dans un bâtiment accolé à Tihange 3. Le déchargement et l'entreposage des

[21] URE = uranium de retraitement enrichi, MOX = oxyde mixte d'uranium et de plutonium (UO2-PuO2).

assemblages irradiés se font sous eau, dans des piscines implantées dans un bâtiment "bunkerisé", mis en service en 1997 (le bâtiment DE "Extension" du bâtiment existant "D").

- Dans une installation modulaire d'entreposage à sec des combustibles irradiés dans des conteneurs métalliques, construite à Doel en 1995.

L'installation d'entreposage à sec de Doel, de conception modulaire, également gérée par l'exploitant, dispose d'une capacité pratique maximale de 165 conteneurs (cette capacité pourrait être réduite à 145 conteneurs au regard de certaines marges de sûreté liées à la température des conteneurs). Chaque conteneur, d'un diamètre extérieur d'environ 2,5 m, abrite 24 à 37 assemblages combustibles, protégés par une paroi en acier massif de 20 cm d'épaisseur[22]. Ce Bâtiment de Stockage de Conteneurs (appelé SCG "Splijtstof Container Gebouw") a été mis en service à Doel en 1995.

Les autorisations de création et de gestion de deux extensions d'entreposage à sec ont été accordées à Electrabel pour les sites de Tihange (26 janvier 2020) et de Doel (1er juillet 2021). Les travaux ont commencé sur le site de Tihange[23] en mai 2020 avec pour objectif de mettre en service le nouveau bâtiment de stockage dans le courant de 2023. Les travaux du bâtiment de Doel ont débuté en 2021, avec pour objectif le premier semestre de 2025[24]. Prévus pour une période d'entreposage de 80 ans, les deux bâtiments sont identiques et pourront recevoir chacun 97 conteneurs, d'une capacité allant jusqu'à 24 assemblages.

1.3 Le stockage définitif : des décisions finales suspendues

La Belgique doit faire le choix politique final, de retraiter ou non, les combustibles irradiés actuels ou à venir.

Retraitement ou non-retraitement

Tant que ce choix ne sera pas arrêté, on ne peut calculer avec précision les volumes de stockage qui seront occupés par les combustibles stockés en l'état et les déchets de "haute activité" et de "moyenne activité à vie longue".

Il faut noter que plus la prise de décision tardera et plus se réduiront les possibilités de recyclage de l'uranium et du plutonium, qui résultent du retraitement, compte tenu de l'espérance de vie des réacteurs du parc nucléaire Belge. Dans le cas du plutonium, Areva propose à ses clients qui n'ont pas, ou qui n'ont plus l'usage du plutonium (condition à remplir pour le retour au client) de le céder à un autre pays qui apporte la preuve de l'emploi de combustible MOX (contrat MOX-TOP).

Le choix d'un type de stockage

Plusieurs années avant la France, la Belgique avait choisi d'étudier le cas d'un stockage dans l'argile et les recherches sur l'enfouissement des déchets vitrifiés de haute activité dans l'argile avaient débuté dès 1974. Deux raisons avaient guidé ce choix : les argiles sont des roches meubles très peu perméables (elles s'opposent à l'eau qui agressera les déchets) et possèdent une forte capacité de fixation des radionucléides. En cas d'attaque des conteneurs de déchets, elles pourront retarder la migration des radionucléides libérés.

---

[22] Les conteneurs sont équipés d'un système à double couvercle (couvercle primaire + une protection anti-missile) assurant le confinement du combustible irradié. La surveillance de l'étanchéité des joints assurant le confinement des matières radioactives est contrôlée en continu et une alarme est déclenchée en cas de problème.

[23] Entreposage | AFCN - Agence fédérale de Contrôle nucléaire (fgov.be)

[24] https://nuclear.engie-electrabel.be/fr/energie-nucleaire/projets-nucleaires-majeurs-en-belgique/nouveaux-batiments-pour-le-stockage

Deux couches d'argiles sont étudiées par l'ONDRAF : celles d'Ypres et de Boom présentes dans le sous-sol, au nord du pays. C'est l'enfouissement dans l'argile de Boom qui a été étudié de la manière la plus approfondie (depuis 1981). De nouveaux forages de reconnaissance ont été réalisés entre fin 2014 et début 2015. D'autres types d'argiles, autres que celles des deux sites candidats sont également étudiés, comme la bentonite qui gonfle en présence d'eau. Son usage permettra l'obturation des orifices qui conduisent au niveau galeries de stockage de déchets radioactifs.

Aux environs de Mol, l'argile de Boom a une épaisseur d'environ 100 m et sa base est située à 290 m de profondeur tandis que la couche d'argile d'Ypres est épaisse d'un peu plus de 110 m et sa base est à une profondeur d[25]e 440 m. Comme les épaisseurs sont voisines, c'est l'importance qui sera apportée au *choix de l'argile* et de la *profondeur d'enfouissement* qui déterminera la zone d'implantation. Mais sous la formation d'Argile de Boom, à une profondeur entre 499 et 574 mètres, se trouve également une autre formation (soit 209 m plus bas que la couche étudiée) contenant des argiles aux propriétés intéressantes.

Dans un laboratoire souterrain creusé dans l'argile de Boom, "HADES", situé près du Centre de Mol (SCK-CEN), l'ONDRAF examine depuis plus de quarante ans, à 225 mètres de profondeur, la mise en stockage géologique des déchets de longue durée de vie. Un hall de démonstration y est géré par le GIE EURIDICE[26] situé sous le site du Centre d'étude de l'énergie nucléaire (SCK-CEN), à Mol. Ce GIE participe au programme R&D en matière d'évaluation de la sûreté et de la faisabilité du stockage en profondeur des déchets de haute activité et/ou de longue durée de vie. Des expériences en vraie grandeur y sont conduites, comme l'étude de l'influence de l'augmentation de température sur la stabilité du revêtement en béton des galeries, sur les caractéristiques de l'argile ou encore afin de tester le fonctionnement sur une longue période des instruments de mesure dans des conditions de température, de pression et d'humidité représentatives des conditions réelles de stockage.

Une installation d'encapsulation des combustibles irradiés a été étudiée afin de conditionner la fraction de ces combustibles qui ne sera pas retraitée. Cette opération consiste à mettre chaque assemblage dans en emballage cylindrique en acier - appelé "over pack" - qui serait placé dans une gaine en béton, par analogie avec les déchets vitrifiés. Dans l'hypothèse d'un non-retraitement, les éléments combustibles, encapsulés ou non, seront placés dans des "châteaux" qui serviront à l'entreposage à sec avant le stockage définitif.

Le conteneur utilisé pour le stockage définitif devrait être plus compact que celui de l'entreposage à sec, car les contraintes sont différentes : dans le cas d'une installation d'entreposage, les débits de dose autorisés autour du château sont plus faibles que dans le cas du stockage car ils doivent à la fois, permettre des interventions humaines et être compatibles avec les normes de transport.

Cependant, l'Autorité de sûreté belge, l'AFCN, est d'avis[27] qu'il n'est actuellement pas possible de prendre une décision en faveur d'une catégorie de formation hôte, laquelle constitue avec son environnement géologique les composants de sûreté principaux qui permettent d'assurer à long terme la protection de l'Homme et de l'environnement. Pour le stockage définitif, les épaisseurs

[26] EURIDICE : "*European Underground Research Infrastructure for Disposal of nuclear waste in Clay Environment*" (Infrastructure de recherche souterraine européenne pour le stockage de déchets radioactifs dans un environnement argileux).

[27] Avis de l'AFCN sur le Programme National pour la gestion du combustible irradié et des déchets radioactifs présents sur le territoire belge : http://www.fanc.fgov.be/fr/news/avis- de-l-afcn-sur-le-programme-national-pour-la-gestion-du-combustible-irradie-et-des- dechets-radioactifs-presents-sur-le-territoire-belge/834.aspx/

permettent de ne pas dépasser la limite de *température en surface* du conteneur[28]. Une installation nucléaire spécifique devra être prévue près du site de stockage afin d'effectuer des transferts de colis très irradiants, depuis les conteneurs de transport vers les conteneurs de stockage.

Mais comme les choix relatifs au stockage ne sont pas encore arrêtés, l'Autorité de sûreté belge, qui est indépendante, pourra encore modifier divers aspects des hypothèses étudiées. Elle met au point les critères de sûreté à respecter pour délivrer l'autorisation de construction d'un site de stockage.

De son côté, l'ONDRAF déclare[29] que "la première priorité est évidemment de garantir la sûreté. Le choix du site et, par conséquent, la définition de la profondeur du stockage, ne sont toutefois absolument pas encore à l'ordre du jour" et précise que : "le stockage géologique à 220 mètres de profondeur comme solution de gestion à long terme pour les déchets de haute activité et/ou de longue durée de vie n'a pas été proposé".



Figure 18 : Le laboratoire HADES

2. Analyse critique

2.1 Avis de l'Autorité de sûreté[30]

Le résumé de l'Avis AFCN relatif au projet d'Arrêté royal relatif sur la gestion à long terme des déchets hautement radioactifs et/ou à longue durée de vie (mai 2021).

« À la demande des ministres de l'Énergie et de l'Économie et du Travail, l'Agence fédérale de Contrôle nucléaire (AFCN) a rendu son avis sur la gestion à long terme des déchets hautement radioactifs et/ou à longue durée de vie. L'AFCN est favorable au stockage en profondeur pour gérer ce type de déchets.

La plupart des pays européens qui produisent des déchets nucléaires ont déjà défini une stratégie concernant la destination finale des déchets radioactifs de haute activité et/ou à longue durée de vie. La Commission européenne a attiré l'attention à plusieurs reprises sur l'absence de politique nationale belge relative à la gestion à long terme des déchets radioactifs de catégorie B et C. L'AFCN estime qu'il est important que la Belgique prenne une position bien

[28] Lorsque le conteneur sera en place, la température de la surface en contact avec l'argile ne devra pas dépasser 90°C, afin de ne pas dégrader les caractéristiques de l'argile.

[29] Stockage des déchets nucléaires: le choix du site n'est pas à l'ordre du jour, assure l'Ondraf, RTBF 24 novembre 2016, http://www.rtbf.be/info/societe/detail_stockage-des- dechets-nucleaires-le-choix-du-site-n-est-pas-a-l-ordre-du-jour-assure-l-ondraf?id=9462807

[30] Avis de l'AFCN : https://afcn.fgov.be/fr/system/files/20210520-fanc-advies_kb-nationale-beleidsmaatregel-langetermijnbeheer-b-enc-afval-fr.pdf

définie sur cette question afin d'éviter de reporter la responsabilité sur les générations futures et de laisser à long terme les déchets dans des installations d'entreposage temporaire en surface.

L'ONDRAF propose d'opter pour le stockage en profondeur. L'ONDRAF a soumis le principe du stockage géologique à la consultation de la population et de plusieurs autorités compétentes, dont l'AFCN, d'avril à juin 2020. Après analyse de la proposition, l'AFCN a déjà manifesté son soutien au principe du stockage en profondeur). L'AFCN avait émis des commentaires, mais ceux-ci ont été, entre-temps, pris en compte dans le projet d'arrêté royal.

L'AFCN préconise également un processus par étapes, permettant à chacune de celles-ci, de vérifier si les conditions sont remplies pour passer à l'étape suivante. Les prochaines étapes comprennent notamment la définition du processus de décision, la définition des modalités de réversibilité, de récupérabilité et de monitoring, et le choix du ou des sites de stockages géologiques. Cette approche par étapes est également reprise dans le projet d'arrêté royal ».

On voit que l'on en est loin d'une prise de décision sur un projet précis de stockage en profondeur. La question des coûts est également cruciale[31].

2.2 Déchets nucléaires : la Wallonie dit non à l'enfouissement

Article de Nicolas Léonard dans « Paperjam » du 15 juin 2020[32].

« La Région wallonne refuse le principe de l'enfouissement des déchets nucléaires, comme préconisé par l'Ondraf. L'enquête publique avait soulevé de vives craintes au Luxembourg.

La Région wallonne a officiellement informé le gouvernement fédéral belge, vendredi, qu'elle rendait un avis négatif quant à la solution de l'enfouissement de déchets nucléaires tel que proposé par l'Ondraf (Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies). Une procédure de consultation publique avait été lancée dans le seul but de savoir si l'enfouissement serait ou non la solution technique retenue pour un projet à concrétiser dans les 20 ans à venir.

La Région pointe des carences dans le dossier

La Région wallonne « pointe des carences importantes dans le dossier remis par l'Ondraf et rejette dès lors la solution d'enfouissement géologique proposée », a fait savoir à nos collègues du Soir le cabinet de la ministre régionale de l'Environnement, Céline Tellier (Ecolo). « La position est donc une demande d'abandonner le projet d'enfouissement à très grande profondeur, au profit de l'enfouissement dit 'de subsurface' » La Région bruxelloise avait aussi marqué son désaccord un peu plus tôt.

Comme souvent en Belgique, le dossier technique est aussi devenu politique. Actuellement, les tensions sont en effet vives entre le parti libéral MR, celui de la ministre fédérale de l'Environnement, et Ecolo, qui est le parti de la ministre régionale de l'Environnement. Ce refus ne va pas contribuer à normaliser les relations.

Pour rappel, la Belgique est tenue de rendre à l'Europe la solution qu'elle compte adopter pour gérer son stock de déchets nucléaires. L'option prise au niveau fédéral est celle de l'enfouissement à grande profondeur. L'Ondraf a donc lancé une enquête publique à l'échelle du pays, première étape pour valider ce principe.

Alertés par la ministre luxembourgeoise de l'Environnement , (Déi Gréng), de nombreux bourgmestres de la province de Luxembourg ont craint que des zones de leur territoire puissent devenir des sites potentiels d'enfouissement. Même si la ministre fédérale de l'environnement,

[31] L'évaluation du coût du stockage en couche géologique profonde, donnée récemment par la ministre fédérale de l'énergie serait de 41 milliards d'euros.

[32] https://paperjam.lu/article/dechets-nucleaires-wallonie-di

Carole Dieschbourg, a très vite rappelé que cela n'était pas le cas et que le sous-sol de toute la Belgique était étudié, la surprise est très vite devenue de la colère.

Inquiets de voir potentiellement des déchets nucléaires être enfouis près de la frontière avec la Belgique, de très nombreux Luxembourgeois se sont alors aussi mobilisés contre ce projet qui va donc peut-être devoir repartir de la case départ. »

Et, dans un autre article[33] :

« La Région wallonne, qui a rendu son avis à l'Ondraf ce vendredi, demande que des alternatives soient investiguées pour qu'une solution réversible et contrôlable puisse être trouvée. "La position est donc une demande d'abandonner le projet d'enfouissement à très grande profondeur au profit de l'enfouissement dit de subsurface", indique le cabinet ».

2.3 L'argile de BOOM en question

RTBF : Où va-t-on les enfouir ?[34]

« C'est la question brûlante. Le gérant de nos déchets radioactifs affirme ne pas avoir encore choisi de lieu. Pourtant, en réalité, un seul endroit a été vraiment bien étudié depuis 40 ans. C'est l'argile de Boom en Campine. Dans le sous-sol flamand de Mol, le laboratoire HADES à 225 mètres de profondeur teste les propriétés de cette terre. La porte-parole affirme que : *" Toutes les recherches que nous avons faites sur plus de 40 ans montrent que l'argile de Boom est une couche géologique adéquate et stable qui pourrait accueillir un stockage géologique. L'argile va capter les radioéléments comme l'uranium, le plutonium, l'américium. Et, ils ne pourront plus jamais s'échapper* ".

Cet enthousiasme n'est pas partagé par tous les scientifiques. C'est le cas de Bertrand Thuillier. En 2018, cet ingénieur agronome français, professeur associé à l'Université de Lille a mis en garde nos politiques. Selon lui, l'argile de Boom ne serait pas assez épaisse pour protéger durablement une ressource en eau potable, la nappe aquifère néogène[35].

En 2011, L'Agence fédérale de contrôle du nucléaire avait déjà pointé cette faiblesse dans l'étude de cette couche géologique :

"La présence de couches aquifères dans l'environnement de l'argile de Boom est à peine mentionnée […] et n'est pas prise en considération ni dans l'évaluation des avantages et des inconvénients de cette formation hôte, ni dans la perspective de comparaison avec d'autres formations possibles […]. "

Les zones de creusement (fracturation), et la migration des radioéléments, Bertrand Thuillier (novembre 2018)

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 ; cette zone est particulièrement délicate car si on considère un diamètre de 6 m utile pour les galeries, soit un

---

[33] https://www.lecho.be/economie-politique/belgique/wallonie/avis-negatif-de-la-region-wallonne-sur-l-enfouissement-geologique-des-dechets-nucleaires/10233101.html

[34] RTBF (Radio-télévision belge de la communauté francophone), 4 décembre 2020

https://www.rtbf.be/info/dossier/investigation/detail_les-petits-secrets-du-nucleaire-les-dessous-de-l-enfouissement-des-dechets?id=10645608

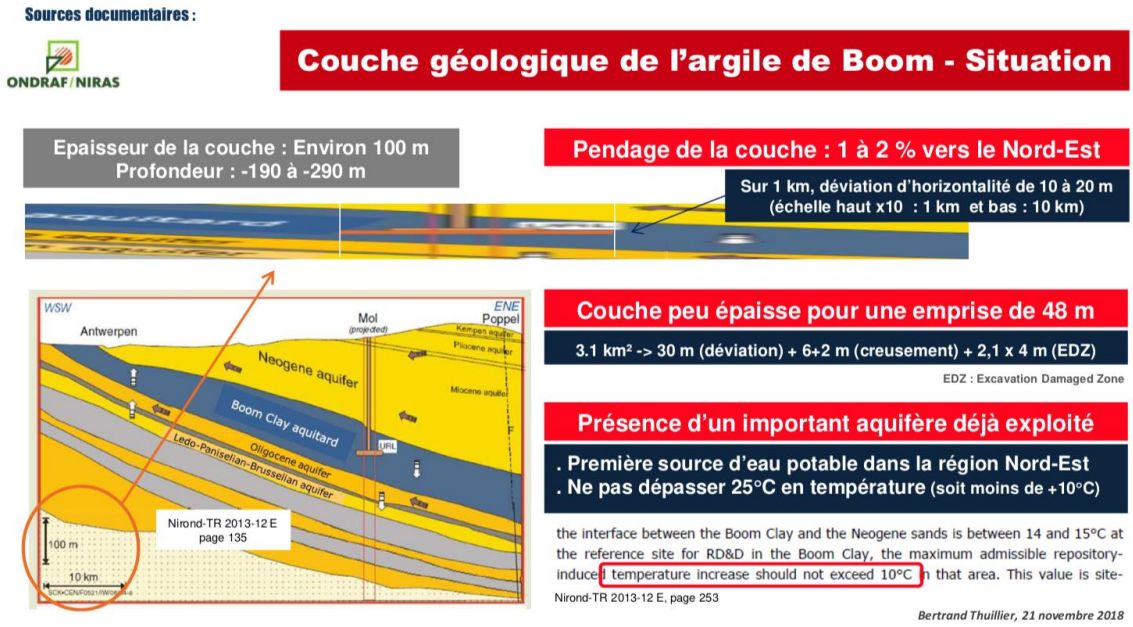
[35] Néogène : partie la plus récente de l'ère tertiaire (de -23,5 et – 1,64 millions d'années, subdivisé en miocène et pliocène. Exemple étudié en France : aquifère néogène du Bas-Dauphiné).

creusement d'au moins 8 m minimum pour insérer les soutènements, cela entraine des perméabilités augmentées jusqu'à 4 à 5 ordres de grandeur[36] dans un espace d'environ 16 m.

Structure du projet, Bertrand Thuillier (novembre 2018)

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, de quelques dizaines de mètres des sources d'eau potable importantes et déjà exploitées,
- L'épaisseur de la couche, trop faible et de surcroît avec un pendage (inclinaison de quelques %, soit une dérive de 40 m pour 2% sur 2 km) ; une telle installation industrielle peut nécessite, a 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 ventilation à proximité de zones habitées.

On ne peut pas 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[37].

[36] Andra : Dossier Argile 2005, Evolutions phénoménologiques du stockage, page 352.

[37] La Gazette Nucléaire n°274, page 8 : https://gazettenucleaire.org/2014/274.html/

3. Annexe – Retraitement de combustibles irradiés belges à La Hague

En 1976, le CEA a signé avec la Belgique, avant la création de la Cogéma, deux contrats de retraitement portant sur un total de 40 tonnes de combustibles. Ces assemblages ont été envoyés entre 1978 et 1979 et ont été retraités entre 1980 et 1981. Les contrats ne prévoyaient pas le retour des déchets.

En 1978, deux autres contrats signés ont porté sur un total de 631 tonnes de combustibles, envoyés entre 1980 et 1999 afin d'être retraités avant 2001.

Ces contrats prévoyaient un retour des déchets.

D'autres contrats ont été signés, après la loi du 28 juin 2006 règlementant l'entrée de ces combustibles en France, mais ils n'ont porté que sur moins de 0,5 tonne.

Avec les matières nucléaires résultant du retraitement à La Hague des 631 tonnes de combustibles irradiés, la Belgique a réalisé 77 tonnes de combustible URE (290 assemblages) et 66 tonnes de MOX (4,8 t de plutonium dans 144 assemblages).

III. Suisse

1. La Suisse

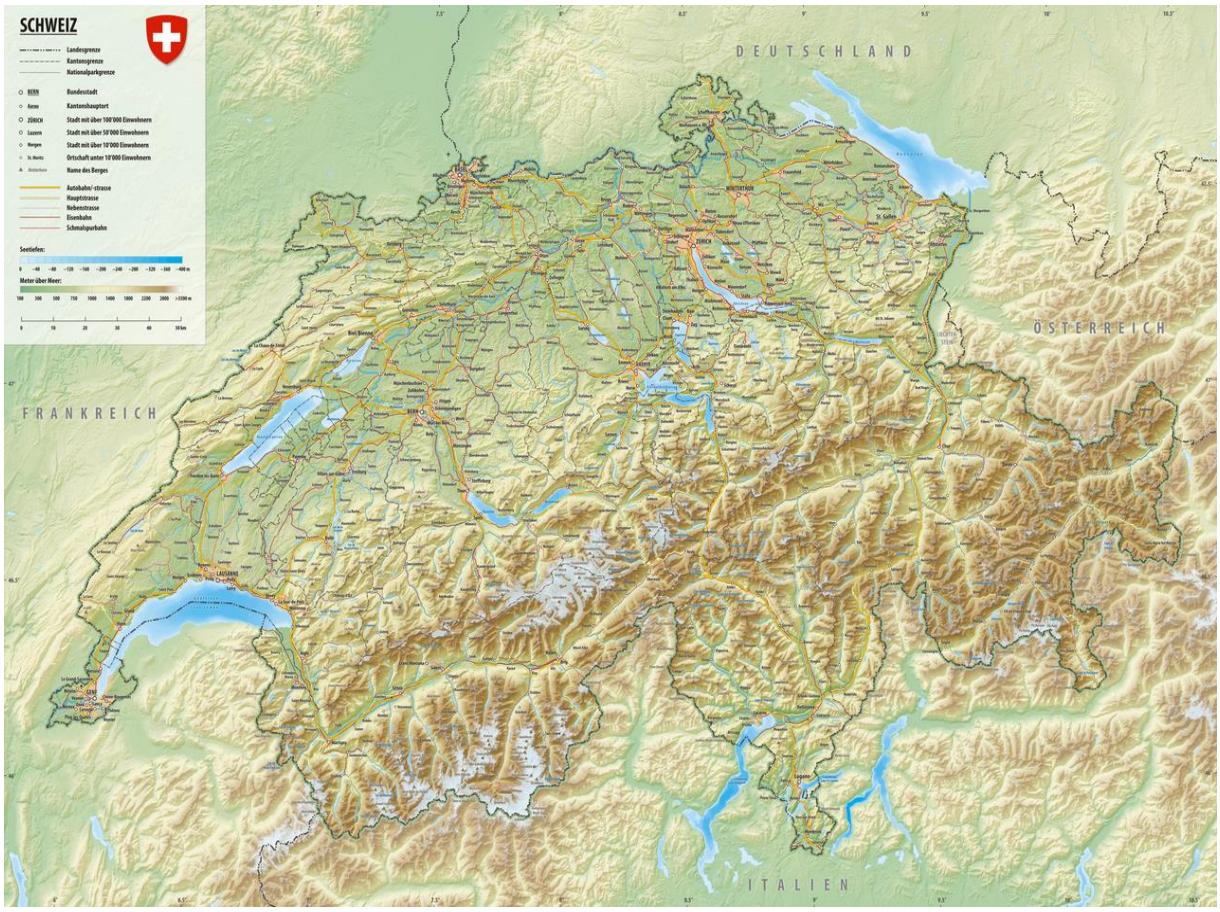


Figure 19 : Géographie physique de la Suisse

La Suisse a une surface de 41 285 km^2. Elle est divisée en trois zones Elle est géographiquement divisée entre les Alpes, le Plateau suisse et le Jura. Les Alpes occupent 60% du territoire.

La population de la Suisse est de 8,6 millions d'habitants, concentrés principalement sur le Plateau, là où se trouvent les plus grandes agglomérations et centres économiques : Zurich, Genève, Bâle et Lausanne. La Suisse est une Fédération de 26 cantons, chacun possédant des pouvoirs étendus, et connaît une longue pratique de la démocratie directe (référendum).

2. L'électricité en Suisse

2.1 Le secteur de l'électricité[38]

En 2020, les énergies renouvelables représentaient environ 76% de la consommation finale d'électricité en Suisse (75% en 2019), à raison de 66% pour la grande hydraulique et de 10,3% environ pour le photovoltaïque, l'énergie éolienne, la petite hydraulique et la biomasse. La part de l'énergie nucléaire s'élevait à 20% et celle des déchets et des agents énergétiques fossiles avoisinait 2%. La provenance et la composition de 2% de l'électricité fournie n'étaient pas vérifiables (4% en 2019).

[38] Source : Office fédéral de l'énergie. Berne, 31 août 2021. https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiques.msg-id-84908.html/

Les données sur le mix des fournisseurs suisses (mix d'électricité chez les consommateurs finaux, voir encadré) sont relevées chaque année et publiées dans le Cockpit du marquage de l'électricité (annexe et sur la plateforme www.marquage-electricite.ch). Les données publiées aujourd'hui renseignent sur l'électricité fournie en 2020. Depuis 2018, la déclaration intégrale obligatoire s'applique au marquage de l'électricité. Par conséquent, l'électricité d'origine inconnue, appelée « courant gris », n'est désormais plus admise que dans des cas exceptionnels et uniquement jusqu'à l'année de livraison 2020. Comme la plupart des pays voisins de la Suisse ne prévoient pas de garanties d'origine pour le courant issu de centrales conventionnelles, la Suisse a introduit des garanties dites de remplacement. Ainsi, l'électricité issue du charbon en provenance de l'étranger peut être déclarée comme telle et n'entre plus dans la catégorie générale du « courant gris ». La part d'électricité issue du charbon importée au moyen de ces garanties de remplacement a de nouveau diminué de moitié entre 2019 et 2020.

L'électricité fournie en 2020 a été produite :

- À 66% par de grandes centrales hydroélectriques (comme en 2019) et à 76% (2019 : 73.7%) en Suisse.
- À 19,9% dans des centrales nucléaires (19,1% en 2019). Cette part est inférieure à celle du nucléaire dans le mix de production suisse (32,9%). Comme l'année précédente, l'énergie d'origine nucléaire fournie provenait presque exclusivement de Suisse.
- À 2,1% de sources d'énergie non vérifiables (4,3% en 2019).
- La part des nouvelles énergies renouvelables (énergie solaire, éolienne, biomasse et petite hydraulique) continue d'augmenter ; elle est passée de 8,4% en 2019 à 10,3% en 2020. Environ 87% de cette électricité a été produite en Suisse et environ deux tiers ont bénéficié d'un encouragement par le système de rétribution de l'injection axé sur les coûts (SRI).
- Une faible part de l'électricité fournie en 2020 provenait d'agents énergétiques fossiles (1,8% contre 2% en 2019).

Avec l'introduction de la déclaration intégrale obligatoire en janvier 2018, les agents énergétiques non vérifiables ne sont plus admis, hormis dans les contrats de livraison pluriannuels conclus avant le 1er novembre 2017 (un délai de transition jusqu'à l'année de livraison 2020 s'applique à ces contrats). Conformément aux attentes, la part des agents énergétiques non vérifiables a baissé du fait de la déclaration intégrale. Les entreprises à forte consommation d'électricité acquièrent des garanties de remplacement pour l'électricité d'origine fossile ou nucléaire provenant de centrales européennes, pour laquelle aucune garantie d'origine conventionnelle n'est établie (voir ci-dessus).

Depuis quelques années, la Suisse importe de l'électricité pendant le semestre d'hiver et en exporte durant celui d'été, quand sa production est excédentaire.

Les échanges avec les pays voisins sont importants : en 2020, 27 TWh d'importations et 32,5 TWh d'exportations.

2.2 Le secteur électronucléaire

Historique de l'électronucléaire suisse[39]

Comparée aux grands pays qui ont développé et construit des bombes nucléaires, la Suisse peut être qualifiée de "suiveur nucléaire". D'entrée de jeu, de par sa taille limitée, le pays ne disposait ni des ressources financières ni des ressources humaines pour lancer un programme aussi ambitieux que le développement d'un projet nucléaire hautement sensible. La Suisse a malgré tout

[39] Source : Rapport mondial sur les déchets nucléaires.

envisagé de se doter de l'arme nucléaire après la Seconde Guerre mondiale. L'importance de cet épisode réside dans l'influence cruciale qu'il a eu par la suite sur la structure du secteur nucléaire du pays.

De plus, Genève a accueilli plusieurs conférences internationales sur l'énergie nucléaire à partir de 1955. À l'issue de la Première conférence internationale sur l'énergie atomique de 1955, la Suisse a acheté aux États-Unis, à des conditions très favorables, le réacteur-piscine mis en exposition. Ce projet posait les bases de l'entrée de la Suisse dans l'énergie nucléaire.

Dans les années soixante, la Suisse a développé sa propre ligne de réacteur à eau lourde, mise en œuvre dans une caverne à Lucens, ville de l'Ouest du pays. En 1969, quelques mois après le début de son activité, le réacteur a subi une fusion partielle du cœur ; un événement qui mit de facto un coup d'arrêt aux ambitions d'armement nucléaire de la Suisse.

Entre 1969 et 1984, cinq réacteurs, d'une puissance comprise entre 350 et 1000 MW, ont été couplés au réseau à Beznau, Leibstadt, Mühleberg et Gösgen. Le développement de centrales nucléaires sur cinq autres sites a été abandonné, en grande partie en raison de l'opposition qui s'est manifestée dans les années soixante-dix et du surdimensionnement du programme. En 2018, la part du nucléaire dans la production d'électricité suisse était de l'ordre de 40 %. Une future expansion de l'énergie nucléaire est peu probable. La loi sur l'énergie nucléaire de 2003 stipule que la construction et l'exploitation d'une installation nucléaire nécessitent une autorisation générale du Conseil Fédéral. L'objectif de l'industrie nucléaire suisse est de poursuivre et finaliser la sélection de sites devant accueillir des stockages destinés aux déchets de faible et moyenne activité, et aux déchets de haute activité, en attendant que de nouveaux types de réacteurs soient commercialisés.

La Suisse n'a pas de mines d'uranium, ni d'installations d'enrichissement, de fabrication ou de retraitement des combustibles. Un moratoire de dix ans sur l'exportation des combustibles usés en vue de leur retraitement est entré vigueur en 2006 et a récemment été prolongé jusqu'en 2020. En 2016, le retour des déchets de retraitement vitrifiés en provenance des usines de La Hague et Sellafield s'achevait, refermant ainsi pour la Suisse le chapitre du retraitement (cycle du combustible au plutonium).

Tableau 1 : Réacteurs en service en Suisse[40]

Réacteur	Exploitant	Filière	Puissance* MW	Début Construction	Connexion au réseau
Beznau-1	Axpo AG	PWR	365	1965	1969
Beznau-2	Axpo AG	PWR	365	1968	1971
Goesgen	KKG	PWR	1010	1973	1979
Leibstadt	KKL	BWR	1220	1974	1984
Muehleberg	BKW	BWR	373	1967	1971

* Puissance électrique nette.

[40] Source : CEA (Elecnuc 2019).

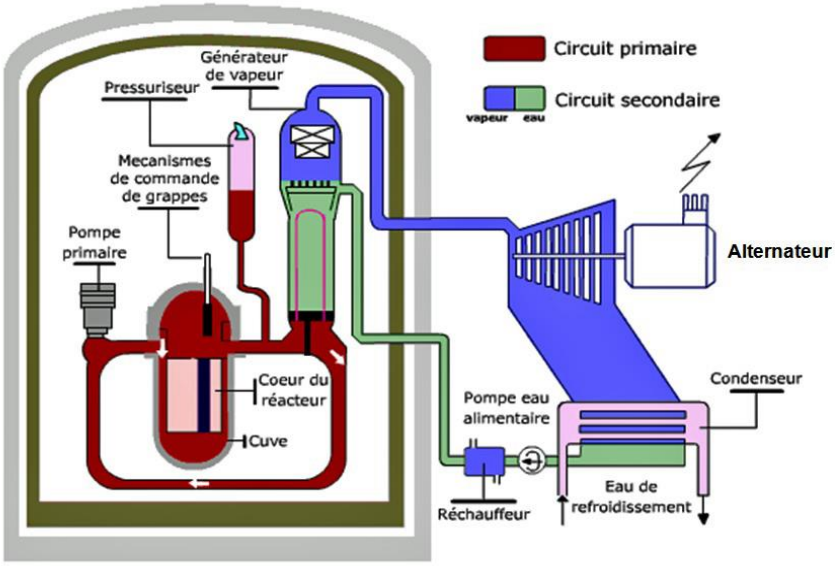


Figure 20 : Réacteur à eau sous pression (PWR)

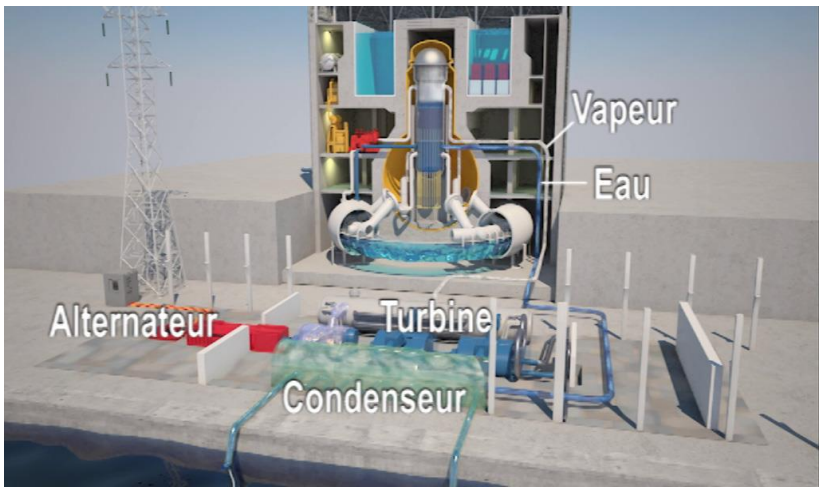


Figure 21 : Réacteur à eau bouillante (BWR)

3. L'entreposage à sec centralisé des combustibles irradiés

Les exploitants des centrales ont fait le choix de regrouper leurs déchets de haute activité, après leur séjour de quelques années dans les piscines des réacteurs, dans un entreposage à sec centralisé[41].

ZWILAG (« dépôt intermédiaire » ou « entreposage ») est situé dans la commune de Würlingen, dans le canton d'Argovie au Nord de la Suisse. Il est géré par une société anonyme fondée en 1990, dont les opérateurs des centrales nucléaires sont actionnaires.

Deux hangars y sont destinés aux combustibles irradiés issus des centrales et aux déchets vitrifiés provenant de l'époque où la Suisse envoyait ses combustibles irradiés pour être « retraités » dans les usines de La Hague en France et Sellafield au Royaume-Uni (les derniers déchets vitrifiés ont été rapatriés en 2016). Ces déchets y sont entreposés depuis 2001.

Les combustibles irradiés sont mis en conteneurs sécurisés sur le site de la centrale, notamment fournis par la société française Orano, puis transportés par train à ZWILAG.

[41] La centrale de Gösgen s'est toutefois dotée en 2008 d'une grande « piscine », extérieure au réacteur et à son bâtiment combustible, pour un entreposage à eau prévu pour quelques dizaines d'années (en attendant le stockage géologique profond).



Figure 22 : Entreposage à sec des combustibles irradiés à ZWYLAG



Figure 23 : Le site de ZWILAG

4. Le projet de stockage géologique profond

4.1 Décision du stockage géologique profond

La loi sur l'énergie nucléaire du 21 mars 2003 a confirmé le choix du stockage des déchets nucléaires de haute activité (combustibles irradiés et déchets vitrifié en couche géologique profonde d'argile à Opalinus.

L'Argile à Opalinus a été formée au Jurassique, il y a quelque 173 millions d'années. A l'époque, le nord de la Suisse était couvert d'une mer peu profonde, charriant des sédiments provenant d'îles. Dans la région située entre Strasbourg, Stuttgart, Zurich et Berne, des boues argileuses fines se alors sont accumulées au fond de la mer. L'Argile à Opalinus est née de la solidification progressive de ces sédiments. Elle doit son nom aux ammonites « Leioceras opalinum » trouvées dans cette formation rocheuse.

Le choix du site de stockage s'effectue selon le plan sectoriel « Dépôt en couches géologiques profondes ». Cette procédure, dont l'élaboration a fait l'objet d'une large consultation, est dirigée par la Confédération : l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) en assume la responsabilité générale.

Sur cette base, la NAGRA est chargée d'élaborer une proposition de site d'implantation.

NAGRA est une « Société coopérative nationale pour le stockage de déchets radioactifs », créée en 1972 par les producteurs de déchets radioactifs, à savoir les exploitants des centrales nucléaires et la Confédération suisse. Celle-ci est en effet responsable des déchets radioactifs générés par les applications médicales, industrielles et de recherche. Est également membre depuis sa création de l'entreposage ZWILAG.

Ce sont les conditions du sous-sol qui sont déterminantes pour la sûreté du stockage et non pas celles qui règnent à la surface.

4.2 La recherche : laboratoire du Mont Terri

Le laboratoire du Mont Terri situé dans la commune de St-Ursanne dans le comté du Jura est un laboratoire de recherche sur le roches argileuses (à 300 m de profondeur, depuis 1996. Il s'étend aujourd'hui sur environ 1,2 km de galeries dédiées exclusivement à la recherche.

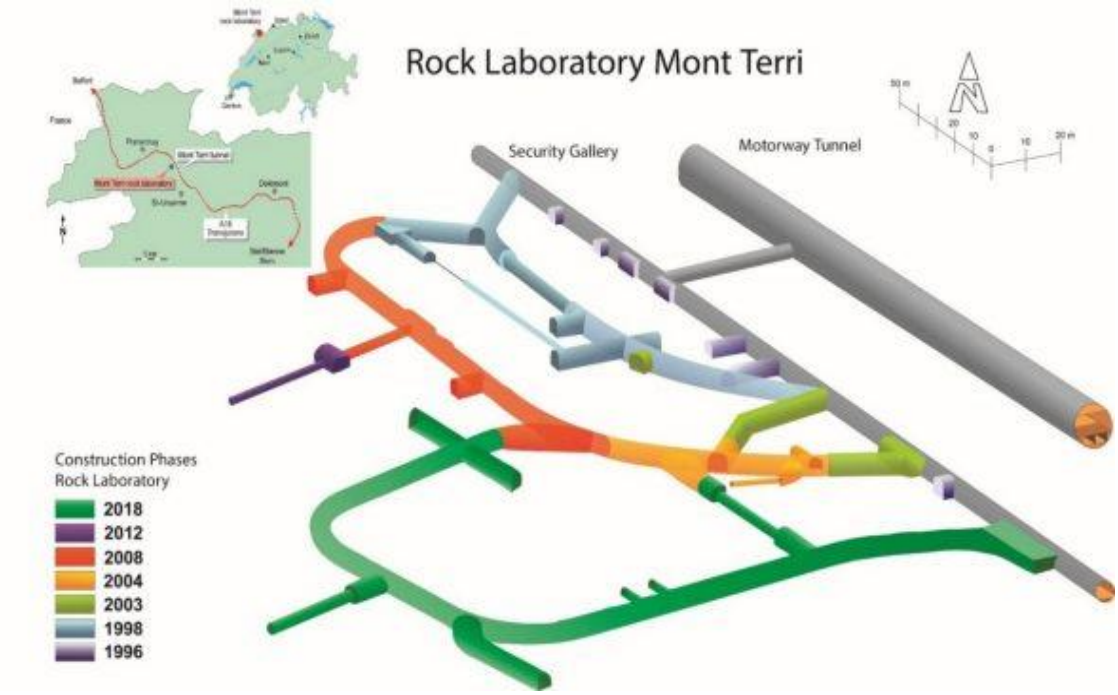


Figure 24 : Plan du laboratoire du Mont Terri

Le projet Mont Terri est dirigé par l'Office fédéral de topographie (Swisstopo), implanté dans le tunnel routier du Mont Terri, à l'initiative de Marc Thery, géologue.

L'Office fédéral de topographie (« Swisstopo ») pilote le programme scientifique, exploite le laboratoire et assure la sécurité du site. La République et canton du Jura est propriétaire du site. Le laboratoire sert exclusivement à des fins de recherche ; il n'est pas question d'y stocker un jour des déchets radioactifs ou du CO_2. Ses 25 ans d'existence ont permis au laboratoire souterrain d'établir sa réputation sur la scène scientifique internationale. Régulièrement de nouveaux partenaires (22 partenaires actuellement) se joignent au consortium du Mont Terri. Les derniers en date sont l'Office fédéral allemand pour la sûreté de la gestion des déchets nucléaires (BASE) en 2019 et l'Agence fédérale allemande pour le stockage des déchets radioactifs (BGE) en 2020.



Figure 25 : Laboratoire du Mont Terri

4.3 Les acteurs de la procédure du plan sectoriel fédéral

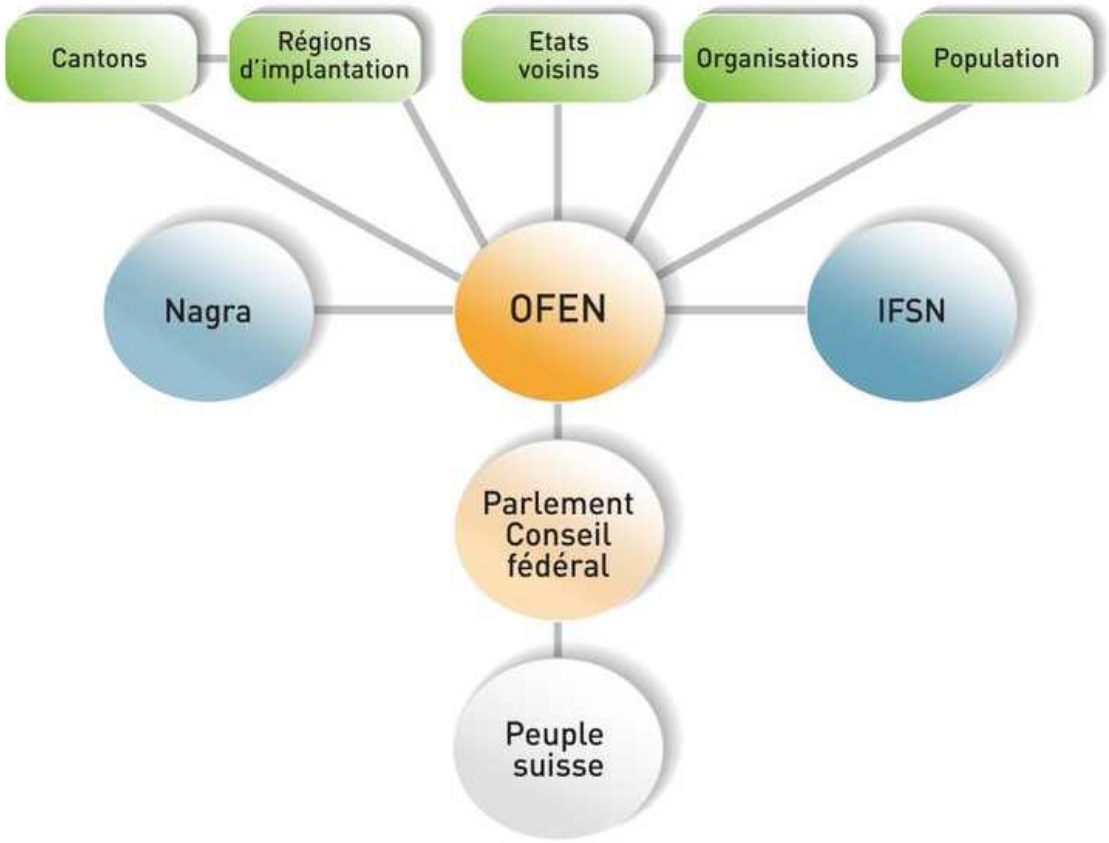


Figure 26 : Les acteurs de la procédure du plan sectoriel fédéral

La Nagra planifie et réalise un dépôt en couches géologiques profondes. Elle a procédé à de nombreuses investigations et élaboré ainsi un solide fondement scientifique. Sur cette base, elle pourra proposer le site d'implantation le mieux approprié et déposer pour celui-ci une demande d'autorisation générale en 2024 environ. Elle prend continuellement en compte l'avancement de la science pour affiner au fur et à mesure le projet de dépôt.

L'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN) est chargée du suivi de la procédure en sa qualité d'autorité de surveillance. En amont, elle formule des exigences à l'adresse de la Nagra, puis elle examine et évalue les propositions de sites qui lui sont communiquées. La demande d'autorisation générale que déposera la Nagra sera examinée en détail par l'IFSN.

L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) dirige la procédure de plan sectoriel et organise la participation régionale. Il est responsable de la communication sur la progression des travaux. Il invitera en temps opportun les cantons et les services spécialisés fédéraux à prendre position sur la demande d'autorisation générale de la Nagra.

Les cantons, les communes, la population et les organisations intéressées dans les régions d'implantation potentielles ainsi que les États voisins sont impliqués dans la procédure et formulent leurs préoccupations dans le cadre de la participation régionale. Lors des consultations, ils peuvent prendre position sur les propositions de sites de la Nagra et sur la demande d'autorisation générale. Les conférences régionales constituent l'élément central de la participation régionale ; elles prennent également position sur la demande d'autorisation générale.

Le Conseil fédéral prend d'une manière générale les décisions relatives à la construction des installations nucléaires, dont font aussi partie les dépôts en profondeur. Sa décision concernant la demande d'autorisation générale de la Nagra interviendra en 2029 environ. Cette décision sera ensuite soumise à l'Assemblée fédérale.

La décision du Parlement concernant la demande d'autorisation générale pour un dépôt en couches géologiques profondes est soumise au référendum facultatif. Cela signifie qu'un référendum peut être lancé contre l'octroi de l'autorisation. C'est donc le peuple suisse qui aura le dernier mot (en 2031 environ). Le stockage en profondeur des déchets de faible et de moyenne activité débutera vraisemblablement aux alentours de 2050, celui des déchets de haute activité vers 2060.

4.4 Les étapes du choix du site

Le plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes » régit la recherche de sites aptes à accueillir des dépôts en couches géologiques profondes. Cette recherche s'effectue en trois étapes durant lesquelles le choix des domaines d'implantation est réduit progressivement. À la fin de chacune, le Conseil fédéral décide de la suite de la procédure. L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) en assume la responsabilité générale. La protection de l'homme et de l'environnement est la priorité absolue de la procédure. La participation régionale mise en place dans le cadre du plan sectoriel permet d'associer à un stade précoce les cantons, les communes et les pays limitrophes.

Recherche de sites aptes à accueillir des dépôts en couches géologiques profondes (procédure du plan sectoriel et procédure d'autorisation générale)	Calendrier
Elaboration de la partie « Conception générale » avec une large participation	de décembre 2004 à avril 2008
Etape 1 (proposition et vérification par les autorités des six domaines d'implantation potentiels, mise en place de la participation régionale)	d'avril 2008 à décembre 2011
Etape 2 (emplacement des installations de surface, participation des conférences régionales, réduction du nombre de sites à en minimum deux)	de décembre 2011 à novembre 2018
Etape 3 (forages profonds, préparation de la demande d'autorisation générale, choix des sites, octroi de l'autorisation générale)	de novembre 2018 à fin 2029
Approbation de la décision du Conseil fédéral relative à l'autorisation générale par le Parlement et, le cas échéant, votation populaire	de début 2030 à fin 2031

Dans la première étape, la recherche est partie d'une carte de la Suisse entière : toutes les régions du pays et toutes les formations rocheuses ont été considérées. Le choix de la roche s'est porté sur l'argile à opalinus et six sites, au nord du pays, ont été identifiés et étudiés du point de vue géologique.

A la fin de cette étape, le Conseil fédéral a retenu trois sites potentiels : Jura-est (canton d'Argovie), Nord des Lägern (cantons d'Argovie et de Zurich) et Zurich nord-est (cantons de Thurgovie et de Zurich), avec les aires correspondantes pour l'installation de surface.

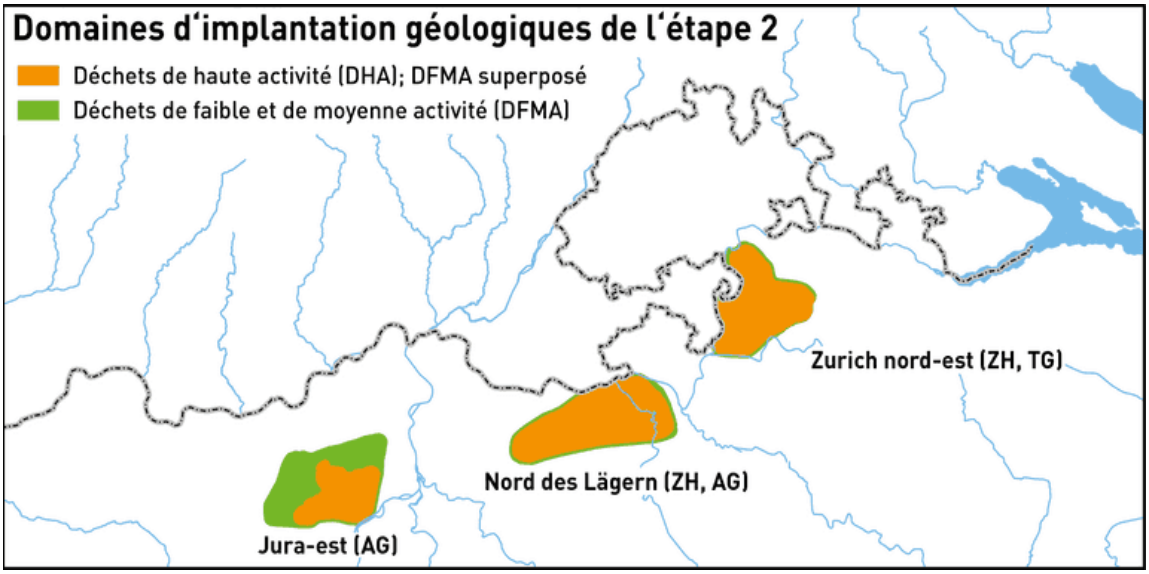


Figure 27 : Trois zones sélectionnées pour le projet de stockage géologique profond suisse

Ce sont ces trois domaines d'implantation que la NAGRA étudie en détail dans le cadre de l'étape 3 du plan sectoriel. Le programme d'investigation englobe des campagnes sismiques ainsi que des forages en profondeur. La Nagra doit annoncer en 2022 lequel des trois domaines est, de son point de vue, le plus approprié.

D'après « Le Moniteur » du 11 avril 2022 :

« Depuis 2019, la Nagra a procédé à neuf forages profonds sur les trois sites potentiels. Elle en a extrait 6 000 carottes dont 4 000 échantillons ont été analysés. D'autres études, notamment des campagnes sismiques en 3D, ont complété ces travaux pour un montant total de 240 millions de francs suisses (235 millions d'euros). « Ces forages ont confirmé que les trois régions permettaient d'accueillir un site de stockage profond sûr, explique Felix Glauser, de la Nagra. Nous devons maintenant déterminer celui qui offre la plus grande marge de sûreté ».

« Après le choix de la Nagra, le chemin sera encore long. En 2024, l'organisme de gestion des déchets radioactifs présentera sa demande d'autorisation au gouvernement suisse, le Conseil fédéral, qui donnera sa réponse en 2029. Vu son caractère épineux, il est probable que le choix du site fera l'objet d'un référendum – il faut 100 000 signatures pour déclencher la procédure, attendue pour 2031. Dans le cas où son résultat serait négatif, l'exécutif suisse ne pourrait pas s'y opposer. Il faudrait donc trouver un autre emplacement pour ce projet actuellement évalué à 19 milliards de francs suisses et dont le remplissage devrait être achevé en 2075 ».

4.5 Calendrier prévisionnel pour le dépôt combiné



Figure 28 : Calendrier prévisionnel du projet Suisse

4.6 La décision est prise

La décision de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), septembre 2022 : le site de stockage géologique profond sera situé dans la région nord de Lägern. Information de la Radio-Télévision Suisse (RTS) du 12 septembre 2022[42], extraits :

« La Nagra avait écarté le site du nord du Lägern, notamment parce qu'il existait des doutes sur la qualité des roches entre la surface et les argiles à Opalinus. Les examens complémentaires exigés par le Conseil fédéral ont permis d'écarter les doutes sur la qualité de ces roches, a indiqué le patron de la Nagra ».

« C'est au nord du Lägern que la couche d'argiles à Opalinus est la plus ancienne, la plus épaisse et qu'elle possède la meilleure qualité. C'est aussi là qu'elle est située le plus en profondeur et que la zone adaptée au stockage est la plus vaste, a précisé Matthias Braun. L'argile à opalinus est considérée comme la meilleure barrière de sécurité pour entreposer des déchets radioactifs ».

« Les coûts du stockage final, estimés à environ 20 milliards de francs, n'ont joué aucun rôle dans le choix du site, a affirmé le patron de la Nagra. Seule la sécurité a compté ».

« La Nagra va soumettre à la Confédération les demandes d'autorisation générale pour le dépôt en profondeur, probablement d'ici la fin de 2024. Le Conseil fédéral et le Parlement devront ensuite se

42 https://www.rts.ch/info/suisse/13373368-les-dechets-nucleaires-suisses-seront-enfouis-au-nord-du-lagern-entre-argovie-et-zurich.html

prononcer aux environs de 2029. Un référendum pourrait être lancé. Les citoyens auront alors le dernier mot. Le Parlement fédéral devra ensuite approuver le dépôt. Il est prévisible qu'il y aura ensuite encore une votation populaire ».

« Le début de la construction est prévu pour 2045. Selon la planification de la Nagra, les premiers déchets pourraient être stockés vers 2050. Suivra ensuite une "phase d'observation" qui devrait durer 50 ans. Le dépôt devrait alors être fermé en 2115 ».

« La région du nord du Lägern compte quelque 52'000 habitants répartis dans trois communes argoviennes et douze zurichoises, dont Stadel, où doit être creusée l'installation. Mais une trentaine d'autres communes, y compris de cantons voisins ou d'Allemagne, sont concernées ».

« Une surface pouvant atteindre huit hectares est nécessaire pour l'installation de surface. Cela correspond à environ onze terrains de football. L'ensemble de l'infrastructure en surface nécessite près de 20 hectares ».

Réactions entre résignation et méfiance

« "Aucun endroit ne veut d'un dépôt en profondeur sur son territoire", déclare Dieter Schaltegger, président de la commune de Stadel, après la décision de la Nagra.

Le plus inquiétant, selon lui, est "l'énorme" construction du dépôt en profondeur, prévue entre 2045 et 2060 environ. Il estime cependant qu'il n'y a pas d'autre solution. Un référendum permettrait peut-être de retarder la construction, mais pas de l'arrêter. "On ne peut pas changer le fait que la Nagra considère la région du nord de la Lägern comme le site le plus sûr".

Le PLR et l'UDC zurichois sont eux satisfaits de la décision. Dans un communiqué, l'UDC zurichoise salue le fait qu'après 14 ans, le choix du site d'implantation permette enfin de franchir une étape importante vers un stockage sûr.

La satisfaction du PLR zurichois porte notamment sur la manière équitable, transparente et ouverte, avec laquelle la procédure a été menée. "Bien sûr, personne n'aime avoir une décharge de quelque type que ce soit devant sa porte". Mais pour le PLR, il ne fait aucun doute que les déchets produits en Suisse doivent être éliminés ici.

Pour le PS zurichois, trop de questions restent actuellement en suspens. Le parti mentionne entre autres la protection des eaux souterraines profondes ou la présence éventuelle de gaz naturel qui pourraient remettre en question la construction d'un dépôt en profondeur.

Pour les Vert-e-s suisses, il est clair que la population n'acceptera aucun lieu de stockage des déchets nucléaires devant sa porte tant que la sécurité du dépôt n'est pas garantie et que le volume de stockage nécessaire n'est pas connu.

La dépendance de la Nagra vis-à-vis des exploitants de centrales nucléaires est toujours problématique, selon le parti. »

Le chancelier allemand veut discuter avec la Suisse

« Le chancelier Olaf Scholz a dit lundi vouloir "discuter" avec le gouvernement suisse d'un projet de stockage de déchets radioactifs à la frontière avec l'Allemagne, dévoilé par Berne et qui inquiète Berlin. "Nous devrons en discuter avec tous les responsables et avec le gouvernement suisse", a-t-il indiqué à l'occasion d'une conférence de presse à Berlin. "La nouvelle vient de nous arriver", a-t-il ajouté, précisant que le projet n'était pas encore "formellement" transmis aux autorités allemandes. L'emplacement choisi par la Suisse "pèsera lourdement sur les collectivités du côté allemand", a affirmé de son côté un porte-parole du ministère de l'Environnement[43]. »

[43] Le site de stockage prévu sur la commune de Stadel en Suisse ne se trouve qu'à trois kilomètres à vol d'oiseau d'un village allemand.

IV. Suède

1. La Suède



Le pays a une superficie totale de 528 447 km^2, répartie en 407 340 km^2 de superficie terrestre, 40 080 km^2 de lacs et rivières et 81 027 km^2 d'eaux territoriales.

Après sa dernière guerre en 1814, la Suède connaît la paix, adoptant une politique de non-alignement en temps de paix et de neutralité en temps de guerre. Ce statut prend fin lors du dépôt de sa candidature auprès de l'OTAN à la suite de l'invasion de l'Ukraine par la Russie en 2022. La Suède fait partie de l'Union Européenne depuis 1995, mais pas de la zone euro.

La population de la Suède était de 10,35 millions en 2020.

2. L'électricité en Suède

2.1 Secteur de l'électricité

La politique de l'électricité

Jusqu'à la fin des années 1960, l'accent était mis sur l'hydroélectricité pour alimenter la croissance industrielle de la Suède. En 1965, il a été décidé de la compléter par l'énergie nucléaire, afin d'éviter les incertitudes liées aux prix du pétrole et d'accroître la sécurité de l'approvisionnement. Cette politique a été renforcée par les chocs pétroliers du début des années 1970, à une époque où la Suède dépendait du pétrole pour environ 75 % de sa consommation d'énergie et un cinquième de son électricité - alors que la demande d'électricité augmentait de 7 % par an.

Au milieu des années 1970, la poussée nucléaire est devenue un enjeu politique, et une loi a été adoptée en 1977 pour garantir une gestion appropriée des déchets. Cette loi est à l'origine du leadership mondial de la Suède en matière de gestion du combustible usé (en particulier pour les pays qui ne le retraitent pas). Après l'accident de Three Mile Island, un référendum a eu lieu en 1980 pour décider de l'avenir de l'énergie nucléaire en Suède. Le résultat du référendum a été d'autoriser la construction des réacteurs prévus et d'abandonner progressivement l'énergie nucléaire d'ici 2010. En 2010, cependant, le Parlement suédois a adopté une loi autorisant le remplacement des réacteurs existants par de nouveaux réacteurs sur les sites existants.

Après l'annonce de la fermeture de quatre réacteurs d'ici 2020 en raison d'une baisse de rentabilité, des représentants des compagnies d'électricité E.On, Vattenfall et Fortum ont rencontré le ministre de l'Energie en novembre 2015 et ont prévenu que l'environnement opérationnel de la production d'énergie en Suède était "troublant" et qu'à moyen terme, la production nucléaire ne devait pas être considérée comme acquise. Fortum a déclaré que si "*la sûreté nucléaire est toujours notre première priorité, [...] les investissements lourds en matière de sûreté ainsi que la taxe sur la capacité unique en Suède constituent un fardeau négatif et totalement déraisonnable pour l'énergie nucléaire.*"

À la mi-2016, comme corollaire à l'abrogation de la taxe sur la capacité, le gouvernement a déclaré qu'il envisageait (sans l'exiger) la fermeture de tous les réacteurs nucléaires actuellement en service d'ici 2050.

Depuis 2016, un accord politique prévoit une production d'électricité d'origine 100% renouvelable à l'horizon 2040. Il n'y a pas de projet de construction de nouveaux réacteurs.

Production, consommation et échanges d'électricité

La production totale d'électricité a été de 163 TWh en 2020[44] : 163 TWh, dont : hydroélectricité 71,8 TWh (44%) ; nucléaire 48,9 TWh (30%) ; éolien 27,5 TWh (17%) ; biocarburants et déchets 11,1 TWh (7%) ; charbon 1,8 TWh ; solaire 1,0 TWh ; pétrole 0,3 TWh ; gaz naturel 0,1 TWh.

La production hydroélectrique dépend des précipitations saisonnières, variant de 79 TWh en 2000 à 62 TWh en 2018. La capacité totale était de 41,2 GW de puissance électrique nette à la fin de 2020 et de 43,7 GW à la fin de 2021. Selon la loi, le gestionnaire de réseau Svenska Kraftnät doit veiller à disposer d'une capacité de réserve hivernale de 750 MW. La consommation totale en 2020 était de 122 TWh, soit une consommation par habitant de 11 800 kWh.

Le solde import/export en 2020 était de 25,0 TWh d'exportations nettes (11,8 TWh d'importations ; 36,8 TWh d'exportations).

[44] Source : Agence internationale de l'énergie et Banque mondiale. Données pour l'année 2020

2.2 Secteur électronucléaire : centrales et réacteurs

L'énergie nucléaire en Suède (en juin 2022)

Les réacteurs nucléaires de la Suède fournissent environ 40 % de son électricité.

En 1980, le gouvernement a décidé d'abandonner progressivement l'énergie nucléaire. En juin 2010, le Parlement a voté l'abrogation de cette politique. La politique énergétique du pays en 1997 a permis à 10 réacteurs de fonctionner plus longtemps que prévu par la politique d'abandon progressif de 1980, mais a également entraîné la fermeture prématurée d'une centrale à deux tranches (1200 MW). Quelque 1 600 MW ont ensuite été ajoutés aux dix réacteurs restants dans le cadre de modernisations.

En 2015, il a été décidé de fermer quatre vieux réacteurs d'ici 2020[45], ce qui représente une réduction nette de 2,8 GW de puissance électrique nette. Les systèmes de transmission nordiques et baltes sont fortement interconnectés, et depuis 2013, la Suède est un exportateur net d'électricité, notamment vers la Finlande.

Tableau 2 : Réacteurs en service en Suède

Réacteur	Modèle	Filière	Puissance MW*	Début construction	Connexion au réseau
Forsmark 1	ABB-III, BWR 2500	BWR	990	6/1973	6/1980
Forsmark 2	ABB-III, BWR 2500	BWR	1121	1/1975	1/1981
Forsmark 3	ABB-III, BWR 3000	BWR	1172	1/1979	3/1985
Oskarshamn 3	ABB-III, BWR 3000	BWR	1400	5/1980	3/1985
Ringhals 3	W**	PWR	1072	9/1972	9/1980
Ringhals 4	W	PWR	1130	11/1973	6/1982

* Puissance électrique nette. ** : Westinghouse



Figure 29 : Les centrales nucléaires en Suède

[45] Les quatre réacteurs arrêtés étaient de la filière BWR : Barseback-1, 615/600 MW en 11/1999 ; Barseback-2, 615/600 MW en 05/2005, Oskarshamn-1, 492/473 MW en 06/2017 ; Oskarshamn-2, 661/38 MW, en 12/2016.

Les réacteurs en Suède sont détenus et exploités par Vattenfall (détenu par le gouvernement), et les compagnies électriques privées qui comprennent Uniper SE (anciennement E.ON Suède) et Fortum Suède (détenu majoritairement par le gouvernement finlandais).

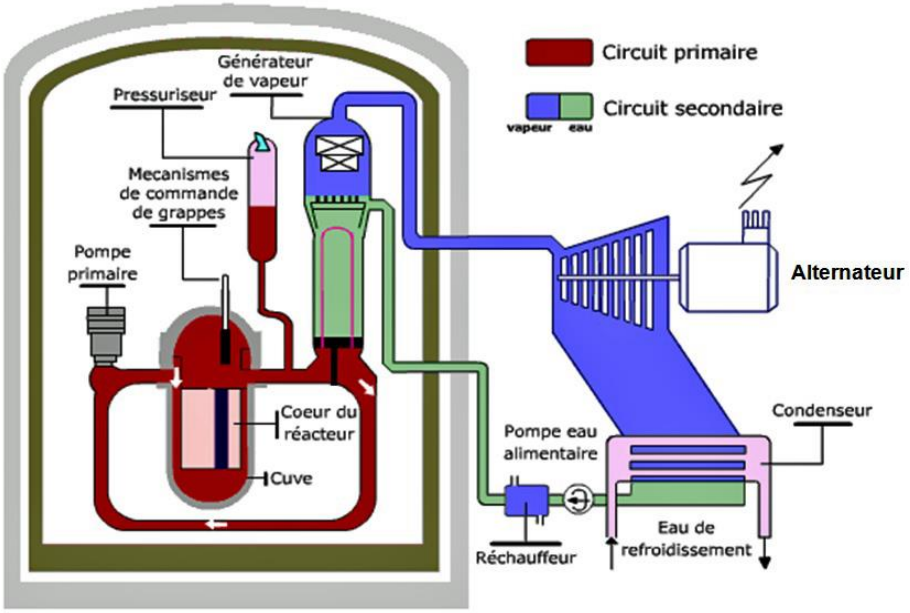


Figure 30 : Réacteur à eau sous pression (PWR ou REP)

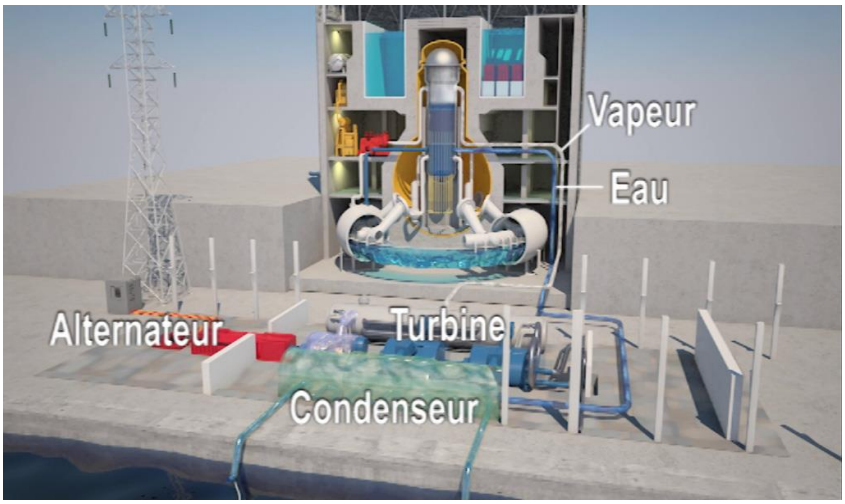


Figure 31 : Réacteur à eau bouillante (BWR)

2.3 Le combustible

La Suède importe la plupart de son combustible nucléaire, y compris tout l'uranium enrichi.

Westinghouse possède une usine de fabrication de combustible à Västerås, qui produit environ 400 tonnes de combustible BWR et PWR par an, fournissant de nombreux pays européens. Vattenfall s'approvisionne en combustible fabriqué par Westinghouse, Areva en France et TVEL en Russie.

Les producteurs d'énergie nucléaire sont responsables des coûts de gestion et d'élimination du combustible usé ainsi que du démantèlement des centrales nucléaires, et doivent prévoir ces coûts au fur et à mesure. Ils versent une redevance fixée par le gouvernement à un fonds d'État administré par l'Autorité de sûreté nucléaire SSM pour couvrir la gestion des déchets et le démantèlement.

Une partie des déchets de faible activité est entreposée sur les sites des réacteurs, et une autre partie est incinérée dans l'installation d'incinération des déchets radioactifs de Studsvik, à Nyköping, rachetée par EDF[46]. Le navire spécialisé de SKB[47], le M/S Sigrid, transporte le combustible irradié et les déchets des centrales vers des lieux de stockage ou des dépôts. En 2014, il a remplacé le Sigyn, plus petit. Un dépôt final souterrain (DRS) pour les déchets radioactifs opérationnels (jusqu'à moyenne activité) et les déchets radioactifs médicaux et industriels est exploité près de Forsmark depuis 1988. Il a une capacité de 63 000 mètres cubes et reçoit environ 1000 mètres cubes par an. Ce site était également l'un des emplacements proposés par la communauté locale d'Östhammar pour un dépôt final de déchets de haute activité (DHA). Il se trouve à quelque 50 mètres sous la mer Baltique.

3. L'entreposage centralisé

CLAB, l'installation centrale de stockage provisoire du combustible nucléaire irradié, est située à Simpevarp, à environ 25 kilomètres au nord d'Oskarshamn. C'est là que tout le combustible nucléaire usé provenant des centrales nucléaires suédoises est conservé en attendant la mise en service du dépôt définitif.

Après cinq ans d'utilisation dans une centrale nucléaire, le combustible nucléaire est usé. Dans un premier temps, le combustible usé est stocké dans la centrale nucléaire, mais après environ un an, il est déplacé vers CLAB. Pendant le stockage provisoire, il est conservé dans des piscines de stockage profondes situées à environ 30 mètres de profondeur dans la roche. En recouvrant le combustible de huit mètres d'eau, on le refroidit et on protège les travailleurs des radiations. Avec le temps, la radioactivité diminue et le combustible est donc plus facile à gérer lors de son élimination définitive dans le dépôt de combustible irradié que SKB prévoit de construire à Forsmark. Cet entreposage est prévu pour 40 à 50 ans.

Aujourd'hui, près de 7300 tonnes de combustible nucléaire irradié sont stockées provisoirement dans l'installation. Cet entreposage est surveillé et contrôlé en permanence. Peu après l'an 2000, l'installation a été agrandie. Aujourd'hui, elle dispose d'un permis pour l'entreposage d'un total de 8000 tonnes. Début 2015, SKB a demandé aux autorités une autorisation pour entreposer jusqu'à 11000 tonnes. La raison en est qu'autrement, il y a un risque que le CLAB soit plein avant la mise en service du stockage de combustible irradié à Forsmark. À la mi-2020, environ 7 300 tonnes de combustible irradié se trouvaient au CLAB. En août 2021, le gouvernement a approuvé une extension à 11000 tonnes.



Figure 32 : Entreposage des combustibles irradiés au CLAB

[46] https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/medias/tous-les-communiques-de-presse/edf-et-studsvik-signent-un-accord-sur-les-activites-de-deconstruction-de-centrales-nucleaires-et-de-gestion-des-dechets-radioactifs

[47] SKB est la société suédoise de gestion du combustible et des déchets radioactifs.

4. Les déchets de haute activité : le projet Forsmark

4.1 Le laboratoire d'Aspö

Le laboratoire souterrain de roches dures de SKB à Äspö, au nord d'Oskarshamn, est l'endroit où se déroule une grande partie des recherches sur le stockage des combustibles nucléaires irradiés. C'est là que sont testées différentes solutions technologiques à grande échelle dans un cadre réaliste.

À près de 500 mètres sous terre dans une couche granitique, sont menées des expériences en collaboration avec des experts suédois et internationaux. Cette recherche permet d'étudier l'interaction de l'argile bentonite et des conteneurs de cuivre avec la roche de granite dans des conditions réalistes. Ici, des expériences sont faites pour identifier le rôle de la roche en tant que barrière. Cela peut, par exemple, concerner la façon dont la roche ralentit le mouvement des substances radioactives ou la façon dont les microbes affectent les conditions à cette profondeur.

Le laboratoire de roche dure d'Äspö est situé dans l'archipel de Misterhult, à proximité de la centrale nucléaire d'Oskarshamn. Le laboratoire n'est pas seulement utilisé pour des essais expérimentaux sur le terrain. Cela pourrait être décrit comme une répétition générale pour la construction du stockage de combustible usé. Y sont développées et testées différentes technologies et méthodes pour étudier la roche, concevoir le stockage et déposer les conteneurs.

À bien des égards, le laboratoire d'Äspö ressemble au futur dépôt de combustible irradié. Il y a des tunnels, des trous de mise en place, des conteneurs cuivre, de l'argile et des machines. Mais les deux installations diffèrent sur un point important : il n'y a bien sûr pas de combustible nucléaire irradié au laboratoire. Une grande partie de la recherche est entreprise en collaboration avec des universités et organisations. Il existe également une vaste collaboration lorsqu'il s'agit de partager l'expertise et les expériences technologiques avec les organisations homologues de SKB dans le reste du monde. Certaines des recherches du laboratoire Äspö se déroulent dans le cadre du programme européen Eurad (Programme commun européen sur la gestion des déchets radioactifs).



Figure 33 : Le laboratoire d' Äspö

4.2 Le projet Forsmark

Les recherches menées au laboratoire des roches dures d'Äspö, situé à proximité du CLAB, ont permis d'identifier les caractéristiques géologiques de ce dépôt final en profondeur. Les procédures de sélection des sites de 2002 ont abouti au vote de deux municipalités candidates à l'implantation d'un dépôt en couches géologiques granitiques profondes : Oskarshamn (Simpevarp et Laxemar) et Östhammar (Forsmark). Ces deux localités avaient été sélectionnées comme ayant

des caractéristiques de roche-mère potentiellement appropriées, après des études de faisabilité dans huit municipalités. Un sondage indépendant réalisé en avril 2008 dans les deux communautés (N=900 dans chacune) a montré que 83% des habitants d'Oskarshamn et 77% de ceux d'Östhammar étaient favorables à ce que le futur dépôt soit situé dans leur propre localité. Six localités voisines ont également été sondées en 2008 et, si la majorité des résidents étaient favorables à un dépôt final dans les municipalités voisines, le soutien diminuait à mesure que la distance par rapport aux opérations nucléaires en cours augmentait.

En juin 2009, SKB a annoncé sa décision d'implanter le dépôt à Soderviken, près de Forsmark, dans la municipalité d'Östhammar, en raison de sa meilleure géologie. En avril, elle avait signé un accord d'investissement avec les deux municipalités volontaires, prévoyant un investissement de 2 milliards de SEK[48] (245 millions de dollars) dans les deux, la majorité allant au soumissionnaire non retenu, qui sera ainsi désavantagé financièrement. SKB a demandé une licence pour construire le dépôt en mars 2011, et prévoyait de commencer les travaux sur le site en 2013. En juin et novembre 2015, le SSM a répondu par des conclusions préliminaires selon lesquelles le projet devrait satisfaire à toutes ses exigences en matière de sécurité et de radioprotection, tant en exploitation qu'après la fermeture.

SKB a demandé un permis pour construire l'usine d'encapsulation de Clink à côté du CLAB à Oskarshamn en novembre 2006. Cette usine sera exploitée avec le CLAB, comme une installation intégrée. Le combustible irradié encapsulé fera son dernier voyage d'ici au dépôt d'Östhammar. En juin 2012, un examen de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE a indiqué au gouvernement que le concept de dépôt intégral de SKB était solide et répondait aux exigences de sécurité à long terme. En mars 2016, le SSM a émis un avis positif sur les plans de SKB concernant l'installation intégrée CLAB-encapsulation.

En juin 2016, le SSM a évalué que la demande d'autorisation de SKB comprenant l'installation

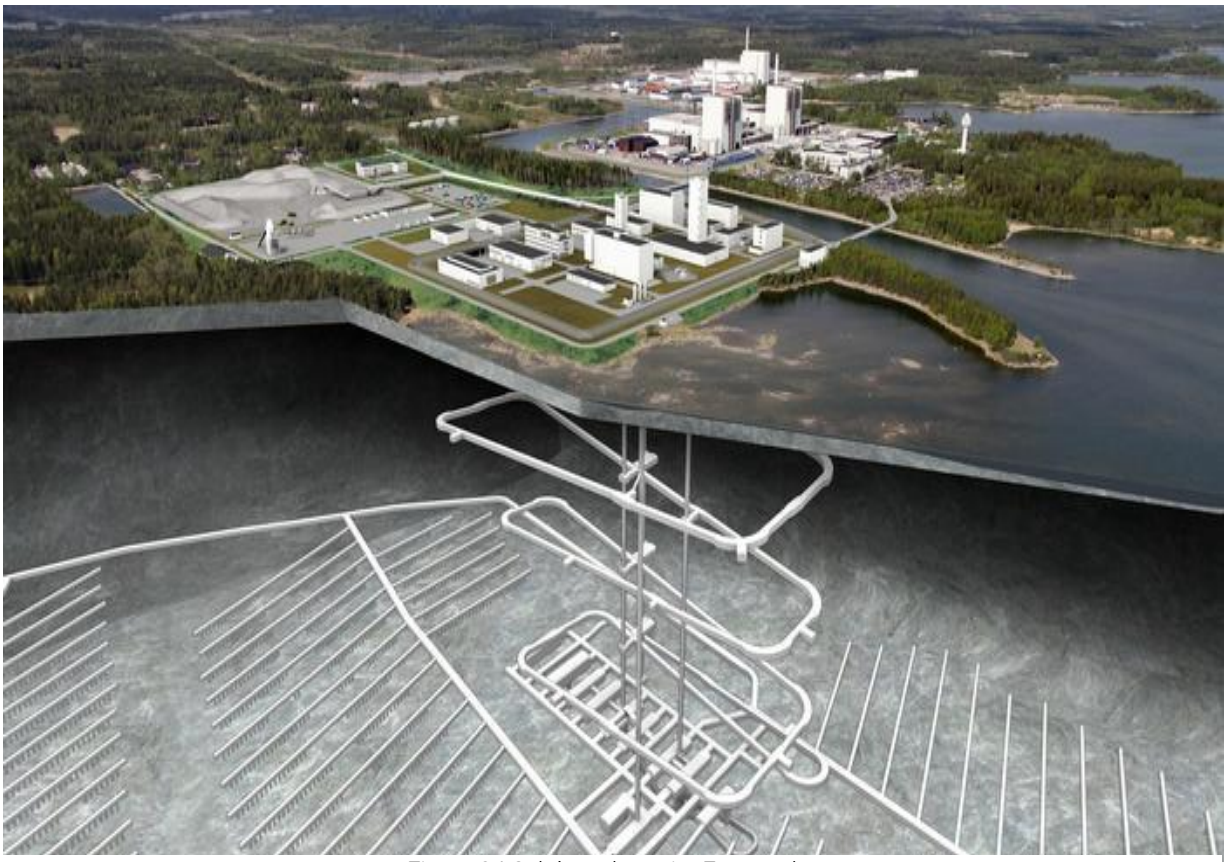


Figure 34 Schéma du projet Forsmark

[48] SEK : couronne suédoise. Au 1er janvier 2022, 1 € valait 9,1 SEK.

d'encapsulation et le dépôt de Forsmark avait le potentiel de se conformer à ses exigences, et a recommandé à la Cour Foncière et Environnementale de Stockholm de l'autoriser. En janvier 2018, le SSM a soumis au gouvernement un avis positif sur la demande de SKB. Toutefois, la Cour a demandé des documents supplémentaires sur les conteneurs en cuivre dans lesquels le combustible sera stocké. SKB espère commencer la construction, qui durera dix ans, au milieu des années 2020.

Le dépôt aura une capacité de 12 000 tonnes à 500 mètres de profondeur dans du granite vieux de 1,9 milliard d'années. Une rampe de 5 km permettra d'accéder à un ensemble de 60 km de tunnels sur une superficie de 4 km^2, dans lesquels seront logés 6 000 conteneurs en fonte de cuivre contenant le combustible irradié. Chaque conteneur de stockage de 25 tonnes contiendra 2 tonnes de combustibles irradiés. De l'argile bentonitique entourera chaque conteneur pour absorber toute fuite. Ce concept de stockage est connu sous le nom de KBS-3. Le KBS-3H comporte des conteneurs horizontaux, le KBS-3V des conteneurs verticaux.

En mai 2021, Ringhals AB et Forsmarks Kraftgrupp AB ont émis un "message commercial urgent" à l'intention de la bourse de l'électricité Nord Pool concernant le risque potentiel que Ringhals 3-4 et Forsmark 1-3 ne puissent redémarrer après des arrêts programmés en raison du manque d'espace d'entreposage sur site pour le combustible nucléaire irradié. Le message indiquait que cette situation était le résultat indirect de la lenteur du gouvernement suédois à traiter une demande d'extension de la capacité de l'installation d'entreposage intermédiaire, CLAB.

En août 2021, le gouvernement suédois a approuvé une demande de SKB visant à autoriser le placement de combustible irradié supplémentaire dans le CLAB, mais a séparé cette approbation de la décision d'accorder ou non un permis de construction pour le dépôt permanent prévu près de Forsmark[49]. En réponse, Vattenfall a déposé un message commercial urgent auprès de Nord Pool, avertissant qu'elle pourrait devoir fermer ses centrales de Forsmark et Ringhals en 2024/2025. Quoi qu'il en soit, un permis de construire pour le dépôt final a été approuvé par le gouvernement en janvier 2022. Cette décision fait de la Suède le deuxième pays seulement (après la Finlande) à accorder un permis de construction pour un dépôt commercial de combustible irradié.

Rapport de l'ANDRA sur le granite

Sur le stockage des déchets de haute activité en couche profonde de granite, on pourra lire avec profit le rapport de l'Andra, « Dossier 2005 Granite »[50], dont la conclusion est la suivante :

« Les études menées par l'Andra dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 dressent un bilan quant à l'intérêt du milieu granitique pour un stockage réversible. Les principales questions liées aux spécificités du milieu granitique ont été identifiées et traitées, sans mettre en évidence d'élément rédhibitoire. Des options possibles tant pour la conception d'un stockage réversible que pour la démarche de sûreté ont été définies de manière générique pour le granite. La principale incertitude porte sur l'existence de sites avec un granite ne présentant pas une trop forte densité de fractures, ce qui contraindrait trop fortement les architectures d'un stockage ».

Concernant le choix du granite comme couche géologique protectrice, ce rapport de l'Andra nous dit :

Page 79 :

« À l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années, un massif granitique et son environnement sont susceptibles de modifications liées aux phénomènes géodynamiques internes (mouvements tectoniques, tremblements de terre, volcanisme) ou externes (changements climatiques et phénomènes d'érosion en surface). Les études ont ainsi pour

[49] Situé à 100 km au nord de Stockholm.

[50] https://www.andra.fr/sites/default/files/2017-12/267.pdf

objet d'identifier les phénomènes pouvant intervenir aux différentes échelles de temps à prendre en compte dans l'évolution d'un stockage ».

Page 85

« L'architecture générale des installations souterraines est adaptée à la structure du granite encaissant. Les modules de stockage sont implantés dans les « blocs » de granite à l'abri des failles conductrices d'eau. Une distance de garde de plusieurs dizaines de mètres (selon les caractéristiques locales du granite) est préservée entre modules et failles. Les distances entre modules sont généralement de l'ordre de la centaine de mètres. L'architecture générale d'un stockage dépend de la distribution des « blocs » dans le massif granitique hôte du stockage ».

4.3 Le stockage définitif des combustibles irradiés

Décision du ministère de l'Environnement publiée le 27 janvier 2022

Le gouvernement Suédois a approuvé (le 26 janvier 2022) la demande concernant le dépôt définitif de combustible nucléaire irradié et l'usine d'encapsulation nécessaire à la gestion de ces combustibles. Au cours de la prochaine étape du processus, la Cour foncière et environnementale délivrera un permis et stipulera ses conditions. L'autorité suédoise de radioprotection examinera et approuvera ensuite les futurs travaux dans le cadre d'un examen par étapes[51].

La société suédoise de gestion du combustible et des déchets radioactifs (SKB) a demandé un permis pour construire et exploiter des installations dans un système cohérent pour l'élimination finale du combustible et des déchets nucléaires usés. Le système d'évacuation définitive comprend une usine de stockage provisoire et d'encapsulation du combustible nucléaire irradié dans la municipalité d'Oskarshamn et un dépôt définitif de déchets nucléaires dans le sous-sol rocheux à Forsmark dans la municipalité d'Östhammar.

Le gouvernement a estimé que la demande satisfait aux exigences énoncées dans le code suédois de l'environnement et dans la loi sur les activités nucléaires. SKB a donc reçu l'autorisation, conformément à la loi sur les activités nucléaires, de posséder, construire et exploiter un dépôt définitif et une usine d'encapsulation, comme indiqué dans sa demande. Le gouvernement a également décidé d'approuver la demande pour les mêmes opérations conformément au chapitre 17 du Code de l'environnement, ce qui signifie que le gouvernement juge acceptable l'impact environnemental futur des opérations.

Conformément au code de l'environnement, le gouvernement va maintenant transmettre l'affaire à la Cour Foncière et environnementale auprès du tribunal du district de Nacka pour un nouvel examen de la demande de SKB. Conformément à la loi sur les activités nucléaires, la décision du gouvernement est subordonnée à la réalisation par l'Autorité suédoise de radioprotection d'un examen continu par étapes, dans le cadre duquel les recherches et le développement technologique futurs feront partie du processus continu.

Le gouvernement a reçu la demande de SKB en 2018

En 2011, SKB a soumis la demande de permis pour le dépôt final à la Cour foncière et environnementale auprès du tribunal du district de Nacka et à l'Autorité suédoise de radioprotection, comme l'exigent le code de l'environnement et la loi sur les activités nucléaires. Après un examen et une préparation approfondie, la demande a été remise au gouvernement le 23 janvier 2018. L'Autorité suédoise de radioprotection et le tribunal des terres et de l'environnement ont soumis des avis séparés en même temps que la demande.

[51] Cette décision fait de la Suède le deuxième pays, après la Finlande, à accorder un permis de construction pour un dépôt de combustible irradié en provenance des centrales nucléaires.

Dans son avis, l'Autorité suédoise de radioprotection a recommandé que SKB reçoive un permis pour le dépôt final sous réserve de l'examen de certains détails dans un processus par étapes au début de la mise en service du dépôt final. Le tribunal du territoire et de l'environnement a recommandé dans son avis au gouvernement d'autoriser les opérations sous réserve d'éclaircissements supplémentaires sur certaines questions et à condition que SKB complète la demande.

Complément de la demande en 2019

En juin 2018, le Gouvernement a donné à SKB la possibilité de compléter ses demandes. Les documents complémentaires soumis par SKB en 2019 comprenaient des documents soulignant le degré de sécurité du conteneur pour le combustible usé, et en particulier la résistance du conteneur en cuivre. Suite au renvoi par le gouvernement de la documentation complémentaire de SKB, cette dernière a eu la possibilité de commenter les réponses à la consultation. Les demandes et les documents complémentaires ont également été publiés afin de garantir l'accès du public à des informations complètes sur la demande de l'entreprise et de lui donner l'occasion de soumettre des avis.

Un élément clé du processus a été d'impliquer toutes les parties prenantes concernées pour leur permettre de partager leurs points de vue sur la demande. Les agences gouvernementales, les chercheurs, les organisations environnementales, les municipalités concernées et le grand public ont tous eu l'occasion de soumettre leurs points de vue sur les demandes à plusieurs étapes. Le gouvernement a reçu un grand nombre de déclarations sur la question, totalisant des dizaines de milliers de pages.

Une méthode sûre pour le stockage final

Les recherches sur les méthodes de stockage se sont poursuivies depuis les années 1970. Le système de stockage définitif comprend une installation de stockage provisoire et d'encapsulation du combustible nucléaire irradié dans la municipalité d'Oskarshamn et un dépôt définitif de déchets nucléaires dans le sous-sol rocheux à Forsmark dans la municipalité d'Östhammar. La méthode utilisée, KBS-3, repose sur la combinaison de trois barrières - les conteneurs en cuivre, l'argile bentonite qui les entoure et le substrat rocheux lui-même - pour protéger les personnes et l'environnement des rayonnements nocifs.

Le gouvernement soutient l'évaluation de l'autorité suédoise de radioprotection selon laquelle il s'agit de la meilleure technologie possible pour le stockage définitif et que la méthode de la triple barrière est sûre et répond aux exigences de la législation, même sur une très longue période.



Figure 35 : Les conteneurs en cuivre

La Suède et la Finlande d'abord - avec une technologie suédoise unique

Le stockage final de Forsmark comprendra 500 tunnels creusés à 500 mètres de profondeur dans la roche. Le dépôt final accueillera 12 000 tonnes de combustible nucléaire irradié encapsulé dans 6 000 conteneurs en cuivre. Développée en Suède, la méthode KBS-3 est une technologie de pointe en matière de gestion des déchets nucléaires. Cette même technologie sera utilisée en Finlande. Au moment où cet article a été publié, aucun autre pays n'a fait autant de progrès dans la gestion de ses déchets nucléaires.

Décision soumise à des conditions et à des exigences en matière de précautions de sûreté

Le gouvernement a décidé d'accorder à SKB une autorisation conformément à la loi sur les activités nucléaires. Le gouvernement a également évalué que les opérations pour lesquelles SKB a fait une demande sont conformes aux exigences fixées par le code de l'environnement, conformément au principe de précaution et à l'exigence relative à la meilleure technologie possible. Le gouvernement a également évalué que l'emplacement convient à l'élimination finale et que son impact sur l'environnement est acceptable, à condition que des mesures de sécurité rigoureuses soient mises en œuvre pour garantir un impact minimal sur le voisinage. Le gouvernement a donc approuvé les opérations conformément au code de l'environnement.

Conformément à la loi sur les activités nucléaires, le gouvernement a stipulé dans le permis des conditions générales exigeant que l'usine soit construite, possédée et exploitée conformément à la demande. Le gouvernement a également conditionné sa décision à l'utilisation de la méthode KBS-3 et à un examen par étapes de la construction.

Dans la décision d'autorisation conformément au code de l'environnement, le gouvernement a stipulé que SKB devait organiser des réunions annuelles avec les municipalités d'Oskarshamn et d'Östhammar, les agences gouvernementales et les organisations environnementales afin de fournir des informations et de maintenir la possibilité de participation.

Une longue période de temps et un long processus avant que le stockage final ne soit opérationnel

Il s'agit de la poursuite d'un long projet. La décision du gouvernement permet de poursuivre le processus de mise en service d'un stockage final pour le combustible nucléaire usé. Conformément au code de l'environnement, le dossier est maintenant transmis à la Cour foncière et environnementale auprès du tribunal du district de Nacka pour conclure la procédure d'autorisation et délivrer un permis assorti de conditions détaillées pour les opérations.

Lorsque le permis entrera en vigueur, l'autorité suédoise de radioprotection examinera alors chaque étape de la construction du stockage final dans le cadre d'un examen par étapes. On estime que la construction et l'exploitation du stockage final dureront environ 70 ans, jusqu'à ce que les déchets nucléaires aient été stockés.

Les questions technologiques et les détails nécessitant des investigations supplémentaires n'empêchent pas de commencer le processus de stockage définitif, mais des recherches et des développements supplémentaires sont encore nécessaires. Il s'agit par exemple de la manière dont les connaissances et les informations seront transmises aux générations futures.

La méthode réelle de stockage final devra également être développée. Le développement de la méthode sera présenté dans les futurs rapports de sûreté conformément aux conditions exigeant un examen par étapes et sera soumis à l'approbation de l'autorité suédoise de radioprotection.

Dans 70 ans, lorsque le dépôt final sera terminé et que tous les conteneurs de déchets nucléaires auront été stockés, le gouvernement en place examinera si le dépôt peut être définitivement scellé.

On trouvera en 5.3 l’annexe de la communication de l’Autorité Suédoise de sûreté nucléaire et de radioprotection (STUK) sur la démarche d’autorisation.

5. Des critiques

5.1 Recherche contre recherche[52] : tenue des conteneurs en cuivre

Les déchets doivent être stockés à 500 mètres sous terre, près du site de la centrale nucléaire de Forsmark. Mais le projet d'enfouissement définitif des déchets radioactifs pourrait ne pas être aussi sûr que SKB le présente.

Des recherches indépendantes ont montré que le cuivre, s'il est stocké sous terre et sans oxygène, peut se désintégrer plus rapidement qu'on ne le pensait. Cela signifie que les capsules ne seraient pas sûres à long terme et que leur contenu dangereux s'infiltrerait dans les eaux souterraines et finirait par remonter à la surface.

"Dans nos expériences, nous avons constaté que la corrosion était 1 000 à 10 000 fois plus rapide que ce que SKB suppose dans son analyse de sécurité", a déclaré Peter Sakas, chercheur en matériaux à l'Université technique royale de Stockholm, qui a mené les études.

La compagnie d'électricité nucléaire rejette ces affirmations, affirmant que SKB n'a pas trouvé dans ses propres expériences la preuve que le cuivre se désintègre. La société appartient aux géants de l'énergie Eon, Vattenfall et Fortum, qui tentent tous de promouvoir l'énergie nucléaire en Suède.

"L'industrie voulait montrer que les déchets nucléaires peuvent être facilement éliminés", prévient Mikael Karlson, directeur de la Société suédoise pour la conservation de la nature, et : "Ils sont arrivés très tôt à leur conclusion et ont ensuite ignoré tous les doutes".

Et pourtant, les critiques de la communauté scientifique se multiplient, affirme Mikael Karlson. Les écologistes se plaignent qu'en choisissant l'emplacement du projet, seuls les intérêts de l'industrie ont été pris en compte. La communauté d'Östhammar n'a accepté le projet que parce qu'elle abrite également la centrale nucléaire de Forsmark.

"Mais ce projet arrive beaucoup trop tôt », déclare M. Karlson. « Nous avons besoin de toute urgence de plus de recherches indépendantes à son sujet ".

5.2 Avis de la Cour Foncière et Environnementale[53]

Forsmark est situé sur le territoire de la commune d'Oskarshamn, district de Nacka (ville de 100 000 habitants), dans le comté de Stockholm.

La société SBK a demandé à la Cour foncière et environnementale un permis au titre de l'environnement pour le stockage définitif des combustibles irradiés et des déchets radioactifs issus du programme électronucléaire, l'avis de la Cour devant être adressé au gouvernement avant sa prise de décision.

L'avis de la Cour sur le projet de stockage en couche géologique profonde de Forsmark a été présenté le 23 janvier 2018 au Tribunal de district de Nacka.

Nous présentons ci-dessous le paragraphe 1.5 du résumé de l'avis de la Cour foncière et environnementale qui conditionne l'autorisation du gouvernement.

1. Le conteneur

« Des preuves supplémentaires sont nécessaires quant à la performance de la capsule (conteneur). La capsule contiendra les déchets radioactifs pendant une très longue période et constitue la principale fonction de sécurité du dépôt. La capsule est dotée d'une enveloppe en

[52] http://www.dw.com/en/sweden-plans-first-ultimate-storage-site-for-nuclear-waste/a-14935527

[53] 843_Nacka_TR_M_1333-11_Sammanfattning_av_MMDs_yttrande_180123.pdf, traduction en français par l'auteur de cette note.

cuivre de 50 mm d'épaisseur et d'un insert en fonte ductile. Il est conçu pour résister à la corrosion et aux contraintes mécaniques.

L'enquête sur la capacité de protection de la capsule est vaste et implique des questions techniques et scientifiques complexes. Il s'agit notamment de la chimie des eaux souterraines, des processus de corrosion et de la fragilisation par fluage et hydrogène (cette dernière affectant la résistance mécanique de la capsule). Les parties ont des points de vue différents sur plusieurs questions qui sont cruciales pour la sécurité à long terme du dépôt.

La Cour foncière et environnementale considère que les incertitudes suivantes concernant la capsule sont de la plus grande importance dans l'évaluation des risques à effectuer :

Corrosion générale due à la réaction dans l'eau sans oxygène.

Les parties ont des points de vue différents sur les questions scientifiques soulevées par cette forme de corrosion. La Cour considère qu'il existe une incertitude importante à cet égard qui n'a pas été prise en compte dans les résultats de l'analyse de sécurité de SKB.

Corrosion locale sous forme de piqûres due à la réaction avec le sulfure[54].

La Cour considère qu'il existe une incertitude importante concernant la corrosion des puits due à la réaction avec le sulfure. Cette incertitude n'a pas été prise en compte dans l'analyse de sécurité. En outre, il existe une petite incertitude quant à l'effet sauna, qui pourrait avoir un effet renforçant sur la corrosion par piqûres.

Corrosion locale sous forme de fissuration par corrosion sous contrainte due à la réaction avec le sulfure.

La Cour estime qu'il existe une incertitude importante concernant la fissuration par corrosion sous contrainte due à la réaction avec le sulfure. Cette incertitude n'a pas été prise en compte dans l'analyse de sécurité. En outre, il existe une petite incertitude quant à l'effet sauna, qui pourrait avoir un effet renforçant sur la fissuration par corrosion sous contrainte.

La fragilisation par l'hydrogène est un processus qui affecte la résistance mécanique du conteneur. La Cour estime qu'il existe une incertitude importante concernant la fragilisation par l'hydrogène. Cette incertitude n'a pas été prise en compte dans l'analyse de sécurité.

Effets des rayonnements radioactifs sur la corrosion par piqûre, la fissuration par corrosion sous contrainte et la fragilisation par l'hydrogène.

Il existe une grande incertitude quant aux effets des rayonnements sur les piqûres, la fissuration par corrosion sous contrainte et la fragilisation par l'hydrogène. Cette incertitude n'a été prise en compte que de manière limitée dans l'analyse de sécurité.

Au total, selon l'évaluation de la Cour Foncière et environnementale, il existe plusieurs incertitudes concernant la capacité de protection de la capsule qui n'ont pas été prises en compte dans les résultats de l'analyse de sécurité de SKB.

2. Le tampon et le remblai

Le tampon autour de la capsule et le remblai dans le tunnel de stockage, devraient retarder la dispersion des substances radioactives, si la capsule perd sa fonction de confinement. Le tampon doit être composé de bentonite, un matériau argileux à grain fin qui gonfle lorsqu'il absorbe de l'eau.

Les principales questions de cette partie portent sur l'érosion du tampon et du remblai, l'impact de la teneur en chlorure[55] sur le tampon, les autres processus de transformation chimique liés à

[54] Nous n'avons pas d'indication sur la nature de ce sulfure. Dans le cas de la corrosion sous contrainte, il pourrait s'agir du phénomène de liquation (teneur en soufre de l'acier).

[55] Même interrogation sur la nature de ce chlorure.

l'érosion du tampon de bentonite, les effets des rayonnements radioactifs, le gel du tampon et la dégradation du béton dans le bouchon du tunnel de stockage.

La Cour foncière et environnementale estime qu'il existe de petites incertitudes concernant l'érosion du tampon et du remblai, l'impact du chlorure sur le tampon et d'autres processus de transformation chimique. Ces incertitudes ont été incluses dans les résultats de l'analyse de sécurité de SKB.

3. La géologie

La Cour foncière et environnementale partage l'évaluation de SSM selon laquelle il est raisonnable de supposer que la région de Forsmark est faiblement sismique. Dans les scénarios d'analyse de sécurité sur les charges de cisaillement, SKB a calculé une fréquence de séisme probable surestimée et a supposé de manière conservatrice que toutes les zones sont réactivées. Compte tenu de ces éléments, la Cour estime que l'incertitude relative aux tremblements de terre est faible.

La Cour foncière et environnementale considère que les incertitudes sont faibles en ce qui concerne les propriétés de la roche, la localisation et les propriétés des zones de déformation et les possibilités d'adapter l'élimination des capsules par le biais, entre autres, des distances de respect. Il y a peu de risque que les conditions rocheuses à la profondeur du stockage soient nettement plus mauvaises que prévu, car les résultats de l'enquête sur le site ont donné une image relativement cohérente de cette situation.

Certaines incertitudes n'ont pas été prises en compte dans les résultats de l'analyse de sécurité de SKB, comme par exemple la situation côtière et la formation d'une zone perturbée. Toutefois, ces incertitudes n'ont qu'une importance mineure dans une évaluation globale des risques.

4. La fermeture

Une fois que l'évacuation des capsules de déchets nucléaires est terminée et que les tunnels d'évacuation ont été scellés, les autres parties du dépôt doivent également être scellées. Pendant la fermeture, les espaces nécessaires à l'évacuation, provenant des tunnels et de la zone centrale sur le site, d'environ 470 mètres de profondeur jusqu'au niveau du sol, doivent être prévus. La fermeture est conçue pour empêcher toute intrusion humaine accidentelle et pour contrer la propagation de matières radioactives en cas de défaillance des barrières du dépôt.

L'évaluation environnementale indique que la fermeture a été étudiée à un niveau plus général et que les détails de sa mise en œuvre n'ont pas été déterminés, car la fermeture est loin dans le futur. La Cour Foncière et Environnementale considère que les preuves apportées par SKB sur la fermeture sont suffisantes pour évaluer l'admissibilité, mais que d'autres preuves sont nécessaires à l'approche de la fermeture.

L'étude montre que le scellement est une partie importante du dépôt du point de vue de la radioprotection. L'étude globale sur la fermeture ne permet pas de procéder à une évaluation finale des exigences de garanties justifiées à ce stade. En outre, la Cour foncière et environnementale comprend que cela sera évalué beaucoup plus tard, lorsque les travaux de fermeture approcheront. Pendant ce temps, la technologie évoluera. Ces circonstances suggèrent que la question des exigences plus détaillées pour le scellement devrait être mise à l'épreuve dans le cadre du code de l'environnement.

5. Évaluation globale de la sécurité radiologique à long terme

L'avis décrit la manière dont la Cour Foncière et environnementale a procédé à une évaluation globale de la sécurité à long terme du dépôt. La Cour a essentiellement procédé de la manière suivante. L'évaluation est basée sur l'ensemble de l'enquête. Le dossier de sécurité de SKB est disponible sur le site SR-Site, qui comprend quelque 900 pages et repose sur des documents d'enquête détaillés. Selon l'analyse de sécurité de SKB, le critère de risque de la réglementation SSM est respecté. L'évaluation de ce résultat tient compte des autres enquêtes, c'est-à-dire des observations écrites des contreparties et des conclusions de l'audience principale. Les

incertitudes identifiées dans l'enquête complète sont comparées aux incertitudes incluses dans le résultat de l'analyse de sécurité de SKB. S'il existe des incertitudes supplémentaires par rapport à l'analyse SKB, l'importance de ces incertitudes supplémentaires est prise en compte lors de l'évaluation du respect du critère de risque. Les incertitudes supplémentaires qui n'ont qu'une importance mineure dans l'évaluation ne doivent pas être prises en compte.

L'évaluation globale des risques peut donc conduire à la conclusion que le risque d'impact sur la santé humaine et l'environnement est acceptable, compte tenu également des incertitudes identifiées dans l'évaluation. L'évaluation peut également être que les incertitudes sont si importantes que l'activité n'est pas autorisée.

La Cour foncière et environnementale considère qu'il n'y a pas eu d'incertitudes concernant le tampon et le remblai qui n'ont pas été incluses dans l'analyse de sécurité de SKB. Certaines incertitudes concernant la roche n'ont pas été prises en compte, mais elles sont de peu d'importance dans l'évaluation globale. Les incertitudes mentionnées ici peuvent être acceptées dans l'évaluation globale.

Toutefois, l'étude montre qu'il existe des incertitudes quant à la mesure dans laquelle les formes et processus de corrosion mentionnés dans les cinq points ci-dessus peuvent nuire à la capacité de confinement à long terme de la capsule. Ces incertitudes sont globalement importantes et n'ont pas été entièrement prises en compte dans l'analyse de sécurité de SKB.

La Cour foncière et environnementale estime qu'il est possible d'accepter des incertitudes supplémentaires. En effet, les résultats de l'analyse de sécurité de SKB montrent qu'il existe une marge importante par rapport au critère de risque de la réglementation de la SSM. Toutefois, les incertitudes concernant certaines formes de corrosion et d'autres processus sont si graves que la Cour ne peut, sur la base de l'analyse de sécurité de SKB, conclure que le critère de risque est rempli. Les éléments actuels ne permettent pas d'étayer suffisamment la sécurité à long terme du dépôt dans une évaluation globale des risques au titre du code de l'environnement.

La conclusion est donc que l'exploitation n'est autorisée que si SKB apporte la preuve que le dépôt est sûr à long terme, y compris en ce qui concerne la capacité de protection de la capsule. SKB devrait avoir l'occasion de soumettre de nouvelles preuves sur les questions décrites dans la section ci-dessus sur la capsule.

SKB devrait, selon l'avis de la Cour foncière et environnementale, fournir en tout cas les informations suivantes dans l'évaluation au titre du Code de l'environnement. Une base est nécessaire pour de nouvelles considérations sur les incertitudes qui sont apparues concernant la capacité de protection de la capsule. »

Remarque : On est frappé par un certain nombre d'appréciations très qualitatives, comme par l'absence d'analyse des conséquences possibles sur ce projet des bouleversements climatiques.

Par exemple :

« La Cour estime que l'incertitude relative aux tremblements de terre est très faible ».

« Il y a peu de risques que les conditions rocheuses à la profondeur du stockage soient nettement plus mauvaises que prévu ».

« Certaines incertitudes n'ont pas été prises en compte dans les résultats de l'analyse de sécurité de SKB, comme par exemple la situation côtière et la formation d'une zone perturbée. Toutefois, ces incertitudes n'ont qu'une importance mineure dans une évaluation globale des risques ».

5.3 Document de l'Autorité suédoise de sûreté nucléaire et radioprotection.

Annexe du document : Stockage définitif des déchets radioactifs et du combustible nucléaire irradié

L'Autorité suédoise de sûreté nucléaire et radioprotection (« Swedish Radiation Safety Authority »), ci-dessous appelée « Autorité suédoise de radioprotection », a notamment pour mission d'examiner les demandes de stockage définitif qui lui sont soumises par Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). Nous examinons les demandes en nous référant à la loi suédoise sur les activités nucléaires et à nos règlements, et nous émettons des avis à l'intention du gouvernement suédois, qui prend ensuite les décisions d'autorisation.

En 2011, SKB a soumis des demandes pour construire une installation d'encapsulation et un stockage final pour le combustible nucléaire usé. Nous avons terminé la préparation du dossier. Dans notre prise de position à l'intention du gouvernement le 23 janvier 2018, nous avons approuvé les demandes de SKB. Le 27 janvier 2022, le gouvernement a décidé d'accorder à SKB une licence en vertu de la loi suédoise sur les activités nucléaires pour construire, posséder et exploiter une installation pour le stockage définitif du combustible nucléaire usé.

En 2014, SKB a demandé l'extension du dépôt définitif existant pour les déchets radioactifs à vie courte (SFR). Dans notre prise de position à l'intention du Gouvernement le 22 octobre 2019, nous avons approuvé la demande de SKB. Le 22 décembre 2021, le gouvernement a décidé d'accorder une licence en vertu de la loi suédoise sur les activités nucléaires et une autorisation en vertu du code environnemental suédois pour l'extension et la poursuite de l'exploitation de SFR.

SKB élabore également des plans pour un dernier stockage final, afin de pouvoir traiter les déchets de faible et moyenne activité à vie longue. L'autorité suédoise de radioprotection surveille les travaux de SKB dans ce domaine dans le cadre de son examen réglementaire du programme de recherche, de développement et de démonstration de l'industrie nucléaire (programme RD&D).

Le stockage définitif pour le combustible nucléaire irradié : Prise de position de l'Autorité suédoise de radioprotection. L'Autorité suédoise de radioprotection a examiné les demandes de SKB en référence à la loi suédoise sur les activités nucléaires et par rapport aux exigences des règlements de l'Autorité. Le 23 janvier 2018, nous avons soumis notre avis au gouvernement suédois, dans lequel nous approuvons les demandes de SKB visant à être autorisé à construire un stockage définitif à Forsmark, dans la municipalité d'Östhammar, l'extension de l'installation centrale de stockage intermédiaire du combustible nucléaire usé (CLAB) dans la municipalité d'Oskarshamn, et construire une installation d'encapsulation adjacente à CLAB. Parallèlement à notre examen des demandes de SKB au titre de la loi suédoise sur les activités nucléaires, la Cour Foncière et environnementale a examiné les demandes de SKB au titre du code suédois de l'environnement. L'Autorité suédoise de radioprotection est un organe consultatif auprès de la Cour Foncière et environnementale et, à l'automne 2017, plusieurs experts en radioprotection de l'Autorité ont pris part à la procédure principale de la Cour concernant les demandes de SKB. La Cour foncière et environnementale a remis son prononcé au Gouvernement le même jour que nous avons remis le nôtre, le 23 janvier 2018. Dans son prononcé, la Cour a considéré que l'opération est admissible si SKB fournit des justificatifs supplémentaires concernant la durabilité à long terme du conteneur en cuivre.

Le processus qui a suivi notre prise de position. En juin 2018, le gouvernement suédois a donné à SKB la possibilité de compléter sa demande selon le code environnemental suédois conformément aux recommandations de la Cour foncière et environnementale. Dans le même temps, le gouvernement a donné à SKB la possibilité de proposer des commentaires sur ses demandes en vertu de la loi suédoise sur les activités nucléaires. En mars 2019, SKB a soumis

un rapport supplémentaire au gouvernement. Le gouvernement a ensuite envoyé les informations supplémentaires de SKB pour consultation, aux parties, y compris l'Autorité suédoise de radioprotection. Le 30 septembre 2019, nous avons noté dans notre déclaration de consultation au gouvernement que les informations supplémentaires de SKB renforcent la position précédente de l'Autorité selon laquelle SKB a le potentiel de répondre à toutes nos exigences réglementaires qui sont pertinentes dans ce cas. Les demandes de SKB visent à obtenir l'autorisation de :

- construire un dépôt final pour le combustible nucléaire irradié à Forsmark, dans la municipalité d'Östhammar,

- agrandir l'installation centrale de stockage intermédiaire du combustible nucléaire irradié (CLAB) dans la municipalité d'Oskarshamn, et

- construire une installation d'encapsulation adjacente à CLAB.

Le 20 juin 2021, le gouvernement a exprimé le souhait d'obtenir des commentaires en consultation sur la procédure consistant à séparer du reste des demandes la partie qui concerne une extension de la capacité de stockage autorisée dans l'installation centrale de stockage intermédiaire, CLAB. Dans notre déclaration de consultation du 8 juillet 2021, nous notons que nous ne voyons pas d'obstacles juridiques à une telle séparation, mais nous évoquons en même temps les problèmes d'acceptation par la société si les décisions sur les demandes dans leur ensemble ne sont pas maintenues ensemble. Le 26 août 2021, le gouvernement a décidé de séparer le traitement des demandes de SKB et d'accorder l'autorisation d'étendre la capacité de stockage dans l'installation centrale de stockage intermédiaire, CLAB. Le 23 septembre 2021, le gouvernement a envoyé une nouvelle demande de consultation à des organismes, dont l'Autorité suédoise de radioprotection. L'objectif était d'obtenir des commentaires, d'une part sur deux études récemment menées concernant les matériaux structurels du conteneur en cuivre et d'autre part sur les étapes de l'expérience dite LOT que SKB a achevée en 2019. L'expérience LOT (LOT : Long-term test of buffer material) est une série d'essais à long terme menés par SKB dans le laboratoire d'Äspö près d'Oskarshamn, dans le but d'évaluer le développement initial de l'argile bentonitique, et dans une certaine mesure également du cuivre. Le gouvernement souhaitait obtenir les évaluations de l'Autorité sur la question de savoir si les résultats des deux études de recherche ont une quelconque importance pour la décision du gouvernement concernant la demande de licence de SKB, et s'il y a des informations supplémentaires provenant des étapes S2 et A3 du LOT qui doivent être rapportées. L'autorité suédoise de radioprotection a répondu à la demande de consultation le 15 octobre 2021. Nous avons estimé que les deux études de recherche portent essentiellement sur des aspects des capacités de protection du conteneur en cuivre qui ont été pris en compte et examinés précédemment par l'Autorité, et que les études n'affectent pas notre évaluation selon laquelle le concept final de dépôt de SKB a le potentiel de répondre à nos exigences réglementaires. Sur la base de l'examen par l'Autorité des travaux de SKB sur la gestion de la qualité en relation avec les étapes LOT achevées, et des résultats de ces étapes, il a été évalué qu'il n'y a aucune raison d'exiger des rapports supplémentaires concernant les essais LOT.

L'Autorité suédoise de radioprotection a noté que les derniers résultats obtenus dans le cadre du LOT sont conformes aux informations obtenues lors des phases précédentes de l'expérience, qui ont été prises en compte et évaluées dans le cadre de la préparation par l'autorité de la demande de licence de SKB, et qu'ils sont également conformes à la compréhension scientifique conventionnelle des processus de corrosion du cuivre. 23 janvier 2018 : L'Autorité suédoise de radioprotection se prononce sur le stockage définitif. 1er octobre 2019 : l'Autorité suédoise de radioprotection approuve les informations complémentaires de SKB concernant le stockage définitif. Le 27 janvier 2022, le gouvernement suédois a décidé d'accorder à SKB une licence en vertu de la loi suédoise sur les activités nucléaires pour construire, posséder et exploiter une installation pour le stockage définitif du combustible nucléaire irradié sur le site de

Forsmark. La décision inclut comme condition d'autorisation l'exigence que l'autorité suédoise de radioprotection mène un processus d'examen continu et progressif avant que l'installation ne soit mise en service de routine. Le gouvernement s'est également prononcé sur l'admissibilité du système de stockage final conformément au code suédois de l'environnement et transmet maintenant l'affaire au gouvernement à la Cour foncière et environnementale qui émet un jugement formel sur l'autorisation et prescrit des conditions en vertu du code suédois de l'environnement.

L'extension du stockage final actuel pour les déchets radioactifs à vie courte (SFR). En 2014, SKB a déposé une demande d'extension et de poursuite de l'exploitation de l'actuel stockage final de déchets radioactifs à vie courte (SFR). En tant qu'organe consultatif auprès de la Cour foncière et environnementale nous avons examiné la demande d'extension de SFR en vertu du code suédois de l'environnement. Le 17 janvier 2019, nous avons soumis notre prononcé au gouvernement suédois, dans lequel nous avons approuvé la demande de SKB en vertu du Code de l'environnement suédois. L'Autorité suédoise de radioprotection a examiné les demandes de SKB conformément à la loi suédoise sur les activités nucléaires. Le 22 octobre 2019, nous avons soumis notre avis au gouvernement, dans laquelle nous avons approuvé la demande de SKB. Le 13 novembre 2019, la Cour foncière et environnementale a soumis son avis au gouvernement suédois, dans lequel il a décidé que l'opération pouvait être considérée comme autorisée. 24 octobre 2019 : l'autorité suédoise de radioprotection recommande l'approbation de la demande de SKB concernant l'extension du stockage.

La décision du gouvernement suédois sur l'extension de SFR. Le 22 décembre 2021, le gouvernement suédois a décidé d'accorder une licence au titre de la loi suédoise sur les activités nucléaires et une admissibilité au titre du code environnemental suédois pour l'extension et la poursuite de l'exploitation de SFR. La licence accordée en vertu de la loi suédoise sur les activités nucléaires contient les conditions d'un processus par étapes pour la construction et l'exploitation expérimentale de l'extension, ainsi que pour l'exploitation courante de l'installation intégrée. Cela signifie qu'avant chaque étape, SKB doit soumettre un rapport de sécurité, qui doit être examiné et approuvé par l'autorité suédoise de radioprotection avant que l'étape puisse commencer.

Dans le cadre de l'examen au titre du code suédois de l'environnement, l'affaire revient devant la Cour foncière et environnementale où des négociations sur les conditions d'autorisation au titre du code suédois de l'environnement auront lieu.

6. Une enquête sociologique

Une enquête sociologique très complète sur le projet *Forsmark* a été publiée en janvier 2020[56]. Nous en reproduisons ici la conclusion.

Knowledge about the Final Disposal of Nuclear Fuel in Sweden: Surveys to Members of Parliament and Citizens – *Jenny Palm.*

Enquête auprès des parlementaires et des citoyens sur le stockage définitif des combustibles irradiés en Suède.

Conclusion

Le stockage définitif du combustible nucléaire irradié est un système technique qui nécessite des connaissances spécialisées. Une norme technocratique caractérise la question des déchets nucléaires, où l'on a souvent tendance à croire que la meilleure façon de résoudre le problème est de disposer d'une expertise suffisante et d'une connaissance détaillée de la question. Dans

[56] https://www.mdpi.com/1996-1073/13/2/374

un tel discours, la discussion est caractérisée par une "solution apolitique du problème" et les arguments moraux sont perçus comme des opinions et non comme des informations utiles.

Une partie de la norme technocratique est que les connaissances du public sont considérées comme déficientes et que les citoyens sont impliqués afin de mieux comprendre une question et d'accepter les connaissances scientifiques. Cependant, ce point de vue est de plus en plus critiqué et l'accent est mis sur l'implication des politiciens et des citoyens dans le processus, car ceux-ci peuvent apporter une contribution substantielle. Le dialogue avec les citoyens et leurs représentants politiques sur des questions liées à la science et à la technologie, comme la question des déchets radioactifs, est une partie importante de la solution à un problème complexe. Il est donc important de mieux connaître les informations dont disposent les députés et les citoyens et la façon dont ils perçoivent la question des déchets nucléaires, ce à quoi les enquêtes présentées ont contribué.

Nous avons constaté que la plupart des députés étaient au courant du processus de demande en cours. Cela pourrait s'expliquer en partie par le fait que dans la lettre d'introduction adressée aux députés avant les entretiens téléphoniques, ils étaient informés du processus en cours. Les citoyens étaient moins au courant. Près de la moitié des citoyens ne savaient pas qu'un dépôt final était prévu en Suède.

Il y a quelques différences entre les femmes et les hommes. La tendance générale est que les femmes semblent plus incertaines que les hommes et optent plus souvent pour la réponse "Je ne sais pas". Les hommes avaient également tendance à en savoir plus sur la question que les femmes, un résultat valable dans les trois enquêtes. Cela indique que la question a jusqu'à présent suscité moins d'intérêt chez les femmes que chez les hommes. Cela peut s'expliquer par le caractère technique des discussions dans les médias, qui se concentrent principalement sur la construction des barrières, et notamment sur le conteneur en cuivre.

Dans l'enquête menée auprès des citoyens, ce sont les femmes et les personnes âgées qui s'inquiètent le plus des différentes menaces énumérées, ainsi que des déchets radioactifs. En ce qui concerne l'emplacement proposé pour le dépôt final, la moitié des députés savaient qu'il s'agissait d'Östhammar, tandis que 27% seulement des citoyens étaient au courant.

Un résultat plutôt inattendu est que plus de personnes interrogées connaissaient plus le matériau du conteneur que le fait que la municipalité d'Östhammar était suggérée comme emplacement pour le dépôt final. Cela indique que les questions techniques ont occupé une place importante dans le débat public et dans l'agenda politique. Il est probablement difficile pour les politiciens et le grand public d'avoir une opinion sur ces aspects techniques. Il semble plus approprié de discuter de questions telles que la localisation et la perception des risques par le public.

En général, les déchets radioactifs sont considérés comme une question importante. Seuls 20% des députés pensent que la question doit être laissée aux experts. Cela pourrait être le reflet de ce qui s'est passé aux États-Unis où les experts ont suggéré Yucca Mountain pour le stockage définitif des déchets radioactifs, mais le public n'a pas suivi cet avis. Ce résultat indique également un potentiel pour des discussions florissantes à l'avenir, mais il faut aussi que quelqu'un soit prêt à lancer une discussion. Jusqu'à présent, cela n'a pas été le cas en Suède.

La majorité des députés et des citoyens pensent que la Suède peut éliminer les déchets de manière sûre. Parmi les citoyens, la confiance dans les décisions des politiciens sur le lieu et la manière de construire un stockage final était faible et une plus grande confiance était accordée aux scientifiques et aux experts. Cela peut être le reflet d'une orientation technologique plutôt que politique/idéologique du débat. Dans cette question, il semble que le public ait plus confiance dans les scientifiques et les experts que les députés, mais il s'agit d'une conclusion impossible à valider à partir du matériel de l'enquête. Les questions aux députés et aux citoyens n'étaient pas posées de la même manière et les questions avaient des significations différentes. Il s'agit toutefois d'une question qui mérite d'être approfondie dans le cadre de recherches

futures. Près de la moitié des citoyens souhaitaient une sortie progressive de l'énergie nucléaire, ce qui est un résultat attendu. Cela correspond, par exemple, aux résultats de l'institut SOM qui vérifie régulièrement les opinions des Suédois sur les sources d'énergie.

La question de la réversibilité et de la récupérabilité n'est pas, comme mentionné ci-dessus, une question à l'ordre du jour en Suède, mais, vu la façon dont le référentiel est suggéré d'être construit, elles seraient possibles. Nous avons donc demandé aux députés ce qu'ils pensaient de la récupérabilité et un nombre étonnamment élevé d'entre eux, plus de la moitié, ont répondu que le dépôt devrait être conçu de manière à permettre le retrait des déchets radioactifs. Cela signifie que même cette question devrait avoir accès au débat public et faire l'objet de discussions. Dans le processus de planification future, il est important non seulement d'impliquer les députés et les citoyens, mais aussi de les approcher avec des questions pertinentes et des questions où ils auront la possibilité de contribuer avec des perspectives pertinentes. La conception d'un conteneur en cuivre n'est probablement pas le meilleur sujet de discussion pour les profanes, mais les questions concernant la récupérabilité, l'endroit où les déchets doivent être stockés et la manière d'informer les générations actuelles et futures sont toutes des questions pertinentes pour le débat public.

Remarque : La question de la réversibilité et de la récupérabilité est importante. Elle est considérée comme telle, au moins en théorie, en Finlande. Il reste manifestement encore beaucoup de choses à mettre au point en Suède avant la réalisation du stockage. Cependant si, comme en Finlande, le remplissage par la bentonite et le béton après chaque mise en place des conteneurs est effectué, il semble bien que l'une et l'autre soient impossibles, sauf pour un colis dont on constaterait la défaillance juste après son placement dans son lieu de stockage.

7. Conclusion

Bien que la conception du stockage en couche géologique profonde, du conteneur au mode de dépôt et le choix du granite, aient été effectués en Suède bien avant qu'en Finlande, celle-ci les a adoptés, a franchi les étapes de décision beaucoup plus rapidement et en est au stade de la construction du stockage. Cela est dû semble-t-il à une phase de consultation et de discussions beaucoup plus importante en Suède et à une moindre confiance aveugle en les autorités et les entreprises et aussi au fait que la Suède a décidé de « sortir du nucléaire » alors que la Finlande « fait confiance » et reste majoritairement « pronucléaire ».

V. Finlande

1. La Finlande

La Finlande se situe au Nord de l'Europe. Bordée au sud par le prolongement de la mer Baltique à l'est et le golfe de Botnie à l'ouest. Elle est voisine à l'Ouest de la Suède (614 km de frontière), au Nord de la Norvège (736 km) et à l'Est de la Russie (1349 km). Sa superficie est de 338 000 km^2 (France métropolitaine : 544 000 km^2) et sa population est, en 2022, de 5,6 millions d'habitants (France métropolitaine : 67,8 millions).



2. Production et consommation d'électricité

2.1 Le bilan électrique de la Finlande[57]

En 2020, la consommation d'électricité était de 77,4 TWh[58].

La même année, la production nationale était de 68,9 TWh, dont : nucléaire, 23,3 TWh (34%) ; biomasse et déchets 11,9 TWh (17%) ; hydraulique 15,9 TWh (23%) ; charbon, 5,5 TWh (8%) ; gaz naturel fossile, 3,7 TWh (5%) ; pétrole 0,3 TWh (0,4%) ; Eolien, 7,9 TWh (11%) ; photovoltaïque, 0,3 TWh (0,4%).

On note d'une part que la production d'origine renouvelable est dominante (51,3%%) et, d'autre part, que la Finlande devait importer :14,9 TWh (21,6 importations, essentiellement de Suède, 6,7 exportations).

2.2 Les centrales nucléaires en Finlande[59]

Deux centrales nucléaires anciennes sont en fonctionnement :

Centrale de Loviisa, réacteurs Loviisa 1 et 2, de 507 MW de puissance électrique nette, raccordés au réseau respectivement en 1977 et 1980, de la filière à uranium enrichi et eau sous pression (PWR), acquis auprès de l'URSS et exploités par la compagnie d'électricité FORTUM.
La centrale est située sur une presqu'île de la côte Sud-Est, au bord de la mer Baltique (refroidissement par l'eau de mer).

Centrale d'Olkiluoto, réacteurs Olkiluoto 1 et 2, de 880 et 890 MW de puissance électrique nette, raccordés au réseau respectivement en 1978 et 1980, de la filière à uranium enrichi et eau bouillante (BWR), acquis de la Suède, exploités par la compagnie d'électricité TVO.
La centrale est située sur l'île d'Olkiluoto, dans le golfe de Bosnie (refroidissement par l'eau de mer).
La centrale d'Olkiluoto est également équipée du réacteur EPR Olkiluoto 3, de 1650 MW de puissance électrique nette, construit par AREVA-Siemens à partir de 2004, ayant démarré en décembre 2021 après de nombreux déboires, qui a fourni ses premiers kWh en mars 2022 mais a été arrêté en juin 2022 à la suite d'un incident, avec une prévision de reprise en décembre 2022.

[57] https://www.stat.fi/til/salatuo/2019/salatuo_2019_2020-11-03_tie_001_en.html

[58] TWh : Térawattheure ou milliard de kWh.

[59] https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/finland.aspx



Figure 36 : Centrale nucléaire de Loviisa, au bord de la mer Baltique.



Figure 37 : Centrale nucléaire d'Olkiluoto. Le réacteur EPR (Olkiluoto 3) est situé à gauche de la figure.

3. Gestion des déchets nucléaires : organisation et institutions[60]

La Loi sur l'Energie Nucléaire de 1987, révisée plusieurs fois pour suivre la réglementation de l'Union Européenne stipule que les déchets nucléaires produits en Finlande doivent être gérés et stockés en Finlande.

3.1 Les institutions

Le Gouvernement définit la politique nucléaire sous contrôle du Parlement, émet les principes de la sûreté nucléaire et accorde les licences de construction et de fonctionnement des installations nucléaires. Le ministère de l'Emploi et de l'Industrie (MEE) contrôle la recherche-développement et la mise en œuvre industrielle.

L'Autorité de sûreté nucléaire (STUK) est une autorité indépendante, responsable du contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection, émet la réglementation et contrôle le respect en termes de sûreté de l'application des licences accordées aux opérateurs.

3.2 Les opérateurs

- Les compagnies d'électricité : Fortum (Loviisa) , TVO (Olkiluoto), FV, Fennovoima Oy (chaleur et électricité, pas de centrale nucléaire). 51% des parts de Fortum appartiennent à l'Etat. TVO est une compagnie privée (27% Fortum, le reste des industriels forts consommateurs d'électricité).
- Posiva : société créée par TVO (60%) et Fortum (40%), responsable de la gestion des combustibles irradiés issus de leurs centrales.

3.3 Le financement

Les compagnies d'électricité sont responsables du financement de la gestion des déchets nucléaires produits par les centrales qu'elles possèdent et exploitent (y compris ceux du démantèlement). Ils doivent alimente chaque année le « Fonds National pour la gestion des déchets nucléaires (*State Nuclear Management Fund*)», géré par le ministère du commerce et de l'industrie, qui va financer les recherches et les travaux de Posiva.

4. Gestion des déchets de haute activité à vie longue

4.1 Pas de retraitement des combustibles irradiés.

Dans les années 1970, l'option du gouvernement était le retraitement des combustibles irradiés. Par un accord de 1969, les combustibles de Lovissa étaient envoyés en URSS pour retraitement et stockage en URSS, tandis que TVO recherchait déjà une solution de stockage définitif des combustibles irradiés de la centrale d'Olkiluoto. La loi de 1994 décidait alors de cesser toute exportation de combustibles irradiés et déchets nucléaires.

Ainsi, contrairement à la France et à un moindre degré la Russie et comme tous les autres pays dotés de centrales nucléaires, la Finlande ne pratique pas le retraitement des combustibles irradiés issus des réacteurs des centrales nucléaires. Les déchets de haute activité et à vie longue sont

[60] https://www.oecd-nea.org/rwm/profiles/Finland_profile_web.pdf

donc les assemblages de combustibles irradiés eux-mêmes, dont il faut assurer la gestion à court, moyen et long terme. Les centrales nucléaires en fonctionnement produisent 70 tonnes de combustibles irradiés par an.

4.2 Entreposage intermédiaire des combustibles irradiés

A la sortie du réacteur, les assemblages de combustibles irradiés sont déposés dans des « piscines » accolées aux réacteurs pendant deux ou trois ans afin de permettre leur refroidissement et la baisse de l'intensité de leur radioactivité.

Ensuite, les combustibles irradiés sont transférés dans un « entreposage provisoire », prévu pour plusieurs dizaines d'années, voire un siècle, constitué, à Olkiluoto, de quatre grandes piscines, situées en partie en dessous de la surface et protégées contre les agressions extérieures. Deux de ces piscines sont consacrées aux combustibles irradiés issus des deux premiers réacteurs et les deux autres à Olkiluoto 3. Ces piscines sont suffisamment profondes pour que les assemblages de combustibles irradiés soient en-dessous du niveau du sol, avec 8 mètres d'eau au-dessus d'eux. Il existe aussi un entreposage provisoire à Loviisa.

4.3 Vers le stockage en couche géologique profonde

Le stockage des déchets de moyenne et faible activité à vie longue est assuré dans des cavernes à une profondeur « intermédiaire » (100 m) sur les sites des centrales nucléaires. Ce stockage fonctionne à Olkiluoto depuis 1992 et à Loviisa depuis 1997.

Dans les années 1980, TVO a recherché des sites pour un stockage géologique profond en couche de granite. Six municipalités ont été sélectionnées mais l'opposition locale a conduit à leur abandon au profit de celle d'Eurajoki sur l'île d'Olkiluoto, en faisant valoir la proximité de la centrale (moins de transports) mais aussi l'approbation locale.

En 1999, le choix du site de stockage en profondeur (450 m) dans le sous-sol granitique se fait pour le lieu-dit Onkalo (« caverne ou grotte » en finnois) sur l'île d'Olkiluoto, non loin de la centrale nucléaire, sur la commune d'Eurajoki, site proposé par Posiva parmi quatre sites possibles. En 2000, demande de Posiva pour un stockage géologique profond proche de la centrale d'Olkiluoto[61]. En 2001, le Parlement approuve la décision de principe du gouvernement pour le stockage géologique profond des assemblages de combustibles irradiés à Onkalo.

Le site choisi a été largement approuvé par la population locale (déjà habituée à la centrale et intéressée par les emplois) : le conseil municipal, qui a le droit de veto, approuve le projet. De façon générale l'opinion publique est largement favorable au nucléaire en Finlande. Ainsi, Posiva a choisi un site très proche de la principale centrale d'Olkiluoto et pas très loin de celle de Loviisa, ce qui réduit considérablement les problèmes de transport des combustibles irradiés, dans une zone fortement peuplée, plutôt qu'un site éloigné et très faiblement peuplé, ce qui ne manque pas en Finlande. En 2004, début de construction d'un laboratoire souterrain pour étudier la couche géologique à une profondeur de 420 m, qui fonctionnera à partir de 2010.

En 2015, l'Autorité de sûreté STUK approuve le dossier de sûreté soumis par Posiva et recommande son approbation par le gouvernement. Le gouvernement accorde à Positiva le permis de construire du stockage géologique profond le 11 novembre 2015. En mars 2021, Posiva annonce le début de construction d'un tunnel de stockage pilote. Le 30 décembre 2021, Posiva soumet au ministère compétent (MEE) une demande de licence pour l'exploitation de l'installation de surface et le stockage souterrain pour la période 2024-2070.

[61] https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20090202



Figure 38 : Le site d'Onkalo, La centrale d'Olkiluoto est en haut de la figure.

5. Le projet Onkalo

Le projet Onkalo consiste à creuser à 450 m de profondeur dans la roche granitique un réseau de tunnels permettant de stocker de manière définitive des conteneurs d'assemblages de combustibles irradiés issus des centrales nucléaires d'Olkiluoto et de Loviisa. Ce réseau souterrain se situerait à 430 m sous la mer.

L'environnement du site serait ainsi protégé de la radioactivité des combustibles irradiés par trois barrières : le conteneur, des protections en bentonite[62] et la couche granitique.

La capacité totale du stockage envisagée est de 6 500 tonnes de combustibles irradiés. La fin de la

Remarque : Sur le stockage des déchets de haute activité en couche profonde de granite, on pourra lire avec profit le rapport de l'Andra, « Dossier 2005 Granite » dont la conclusion est la suivante :

« Les études menées par l'Andra dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 dressent un bilan quant à l'intérêt du milieu granitique pour un stockage réversible. Les principales questions liées aux spécificités du milieu granitique ont été identifiées et traitées, sans mettre en évidence d'élément rédhibitoire. Des options possibles tant pour la conception d'un stockage réversible que pour la démarche de sûreté ont été définies de manière générique pour le granite. La principale incertitude porte sur l'existence de sites avec un granite ne présentant pas une trop forte densité de fractures, ce qui contraindrait trop fortement les architectures d'un stockage ».

https://www.andra.fr/sites/default/files/2017-12/267.pdf

[62] La bentonite est une argile plastique très molle qui gonfle au contact de l'eau.

construction et du remplissage du site est actuellement prévue en 2070.

L'ensemble du dispositif est constitué d'une installation de surface qui reçoit les combustibles irradiés des piscines de refroidissement intermédiaires des centrales afin de les conditionner pour leur stockage définitif, des réseaux de tunnels prévus pour celui-ci, et des moyens de transfert et d'aération entre les deux qui seront définitivement obstrués à la fin du stockage.

5.1 Le dispositif d'ensemble

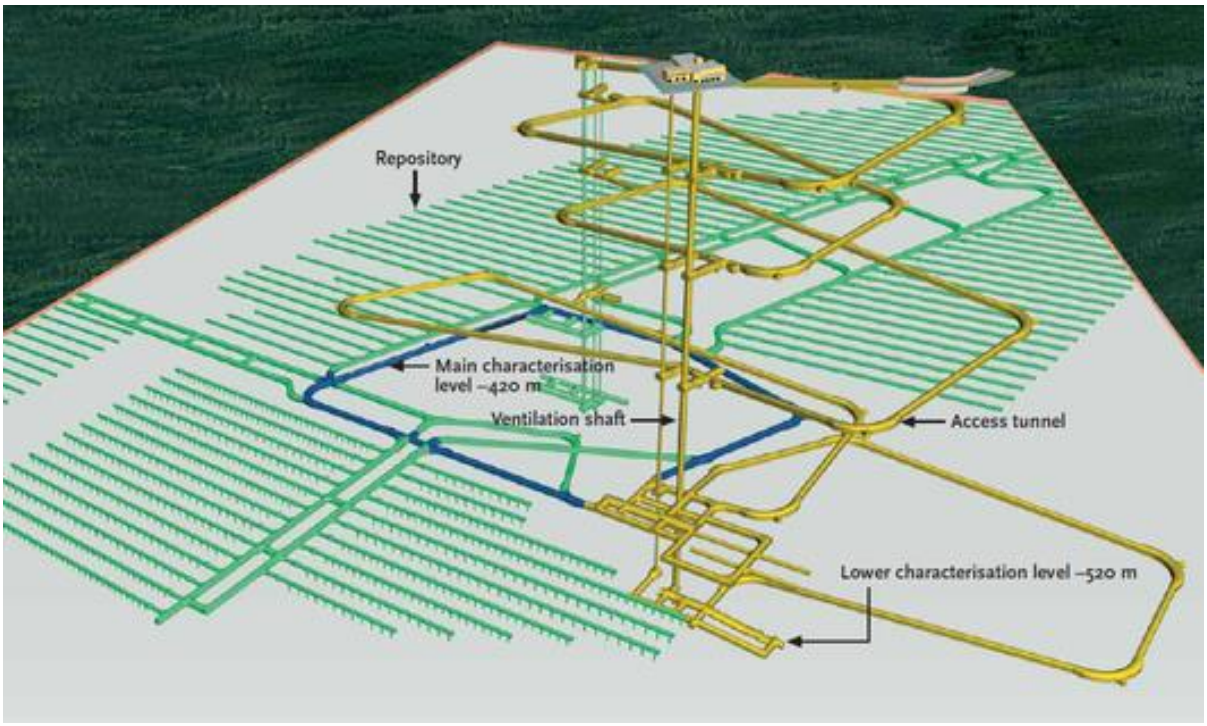


Figure 39 : Le projet Onkalo

On distingue le tunnel d'accès en spirale de la surface à la zone de stockage, de 5 km de long, la principale colonne verticale de la descente des conteneurs (« capsules ») depuis l'installation de surface jusqu'au réseau de tunnels, ainsi que les colonnes de ventilation et d'accès du personnel et, enfin, la zone de stockage à 450 m de profondeur.

5.2 L'installation de surface

L'installation de surface dite d'encapsulage, est semi-enterrée. C'est là que les assemblages sont placés dans les conteneurs adaptés au stockage profond.

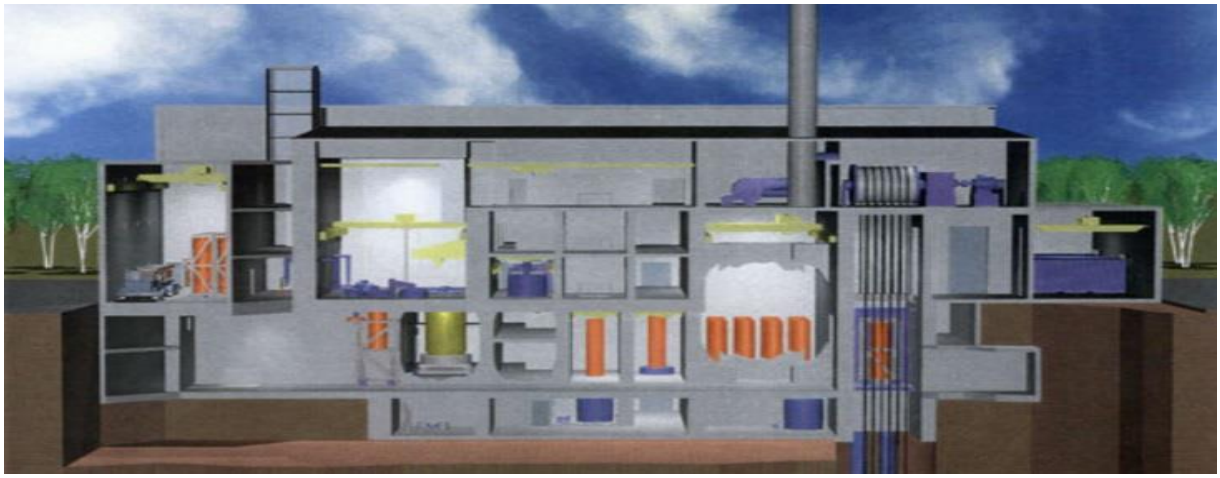


Figure 40 : L'installation de surface du projet Onkalo

5.3 Le conteneur

Le conteneur utilisé est le KBS-3 développé par la compagnie suédoise SKB (*Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company*), mis au point pour le projet de Forsmark en Suède. Douze assemblages de combustibles irradiés sont regroupés dans un premier conteneur en acier boré placé à l'intérieur d'un cylindre de cuivre scellé à ses deux extrémités, constituant une « capsule ». Chaque conteneur est ensuite descendu dans la zone des tunnels par un ascenseur vertical.



Figure 41 : Le conteneur du projet Onkalo

5.4 Les tunnels dans le granite

La zone de stockage est constituée de 200 tunnels qui totalisent environ 70 km. 3259 puits sont ainsi disposés pour contenir les « capsules ».



Figure 42 : Tunnel dans le granite

Concernant le choix du granite comme couche géologique protectrice, le rapport de l'Andra cité plus haut nous dit :

Page 79

« À l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années, un massif granitique et son environnement sont susceptibles de modifications liées aux phénomènes géodynamiques internes (mouvements tectoniques, tremblements de terre, volcanisme) ou externes (changements climatiques et phénomènes d'érosion en surface). Les études ont ainsi pour objet d'identifier les phénomènes pouvant intervenir aux différentes échelles de temps à prendre en compte dans l'évolution d'un stockage ».

Page 85

« L'architecture générale des installations souterraines est adaptée à la structure du granite encaissant. Les modules de stockage sont implantés dans les « blocs » de granite à l'abri des failles conductrices d'eau. Une distance de garde de plusieurs dizaines de mètres (selon les caractéristiques locales du granite) est préservée entre modules et failles. Les distances entre modules sont généralement de l'ordre de la centaine de mètres. L'architecture générale d'un stockage dépend de la distribution des « blocs » dans le massif granitique hôte du stockage ».

5.5 Le chargement

Chaque « capsule » est placée dans un puits vertical creusé dans le sol du tunnel, colmaté ensuite par de la bentonite.

Le granite étant une roche cristalline, il y a donc des risques de fracturation et donc une forte probabilité d'infiltration. Pour pallier cette difficulté, outre la protection assurée par le conteneur, les puits et les tunnels sont colmatés par la bentonite.

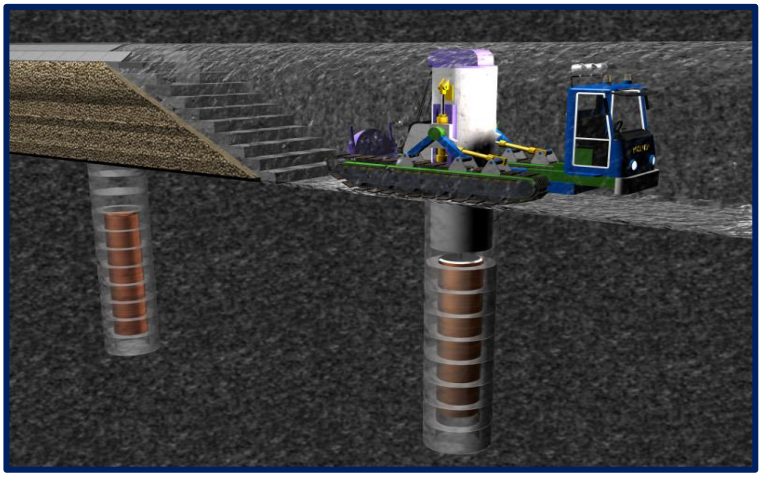


Figure 43 : Le chargement

5.6 Sur la réversibilité et la récupérabilité

Dans sa note de Mars 2000, l'Autorité de sûreté nucléaire, STUK, écrivait :

« La récupération des déchets évacués et l'adoption d'un nouveau concept de gestion du combustible usé sont possibles à chaque phase du programme d'évacuation.

Le concept proposé permet de récupérer les déchets à n'importe quelle phase du projet d'élimination, même dans la phase de post-fermeture. Il est toutefois très peu probable que des aspects de sûreté déclenchent la récupération des déchets évacués.

La raison la plus probable de la récupération des déchets serait un développement mondial qui rendrait les déchets éliminés intéressants comme matière première pour le combustible nucléaire, et la rentabilité économique de la récupération serait alors un facteur crucial ».

Remarque

Au vu de la méthode de chargement qui prévoit le colmatage par la bentonite puis le scellement par du béton, la récupérabilité (récupération d'un colis défaillant par exemple) ne paraît possible que juste après la mise en puits d'un conteneur.

Il en va de même de la réversibilité. L'expression « très peu probable » n'est pas vraiment rassurante.

Le dernier paragraphe est intéressant mais, manifestement, la question de la réversibilité n'est plus apparue dans les étapes suivantes du projet.

6. Démocratie et choix nucléaires

La question de la démocratie dans les choix nucléaires et tout particulièrement ceux liés au projet Onkalo ont été étudiés par des sociologues finlandais et tout particulièrement Markku Lehtonen qui a travaillé notamment sur Bure, dont nous citons un extrait très intéressant ci-dessous, qui rejoint les interrogations sur le projet Cigéo, bien que la comparaison avec la France nous paraisse parfois un peu trop louangeuse.

Le miracle ONKALO : sur l'insoutenable légèreté de la mise en place d'un dépôt de déchets nucléaires en Finlande.[63]

Markku Lehtonen (markku.lehtonen@upf.edu) - 6 mai 2021.

L'autonomie municipale dans une communauté nucléaire

Les facteurs les plus importants qui ont facilité l'avancement du projet sont liés au rôle central des communautés d'accueil dans la gouvernance des déchets nucléaires. Dans le contexte de la précieuse autonomie municipale, l'approbation du conseil municipal a pesé lourd dans le débat et les décisions au niveau national. Grâce à son droit de veto garanti par la loi sur le projet, la municipalité avait un poids important dans les négociations avec l'industrie jusqu'à l'adoption de la DIP. D'autre part, l'autonomie locale signifiait également que Posiva pouvait concentrer ses efforts de persuasion sur un petit nombre de décideurs municipaux clés.

Le choix de Posiva de concentrer ses efforts sur les deux municipalités accueillant des centrales nucléaires a été un facteur clé. Au fil des ans, la communauté a développé une relation presque symbiotique avec l'industrie nucléaire, à tel point que les populations locales étaient particulièrement fières d'accueillir le dépôt. Le succès des efforts de relations publiques de Posiva, doit en grande partie au travail de fond effectué depuis les années 1970.

Au-delà de la fierté et de la responsabilité, Eurajoki était motivée par la dépendance économique vis-à-vis de l'industrie nucléaire. En 2010, un tiers de ses recettes fiscales provenaient de l'industrie nucléaire, principalement sous la forme de l'impôt foncier, qui est nettement plus élevé pour les centrales que pour les autres installations. Jusqu'en 1994, la stratégie municipale comportait en fait une clause de rejet d'un dépôt de déchets nucléaires. Cette clause a été supprimée et la stratégie a ensuite pris explicitement position en faveur du projet,

[63] Traduction par l'auteur de cette note de : *Pre-translation version of Lehtonen, M. 2021. Das Wunder von ONKALO? Zur unerträglichen Leichtigkeit der finnischen Suche nach einem Endlager. APuZ - Aus Politik und Zeitgeschichte 71(21-23): 32-37.*

essentiellement pour des raisons économiques. En outre, en acceptant le dépôt, Eurajoki cherchait à s'assurer la victoire sur Loviisa dans la course au nouveau réacteur de TVO. Selon les journaux locaux, TVO avait fait pression sur le conseil municipal pour qu'il soutienne le projet de dépôt.

Le soutien communautaire volontaire fourni par TVO et Posiva a contribué à l'acceptation de la municipalité. Par le biais de l'accord dit de Vuojoki, la municipalité a loué à Posiva le manoir de Vuojoki, une ancienne maison de retraite communale, en échange d'un prêt de près de 7 millions d'euros de Posiva, pour la construction d'une nouvelle maison de retraite. Les sociétés ont également accordé un prêt d'un million d'euros pour la construction d'un nouveau stade de glace (Kojo 2009) et un fonds de développement commercial de 150 000 euros. Ces sommes étaient modestes, surtout si on les compare au programme de soutien communautaire de près de 200 millions d'euros conclu quelques années plus tard en Suède entre l'entreprise de gestion des déchets et les deux municipalités hôtes. Fait important, et qui contraste fortement avec la France, les paquets d'avantages n'ont fait l'objet de presque aucune critique quant à leur perception comme une forme de corruption.

La forte autonomie des municipalités entraîne également des répercussions sur la gestion des déchets de Fennovoima. Des recherches récentes ont montré que la majorité des citoyens d'Eurajoki n'accepteraient pas les déchets de Fennovoima[64] dans ONKALO. La "responsabilité" des déchets ne semble donc pas s'étendre au-delà des "propres" déchets d'Eurajoki.

La participation des citoyens, pour mieux légitimer les décisions déjà prises ?

La participation des citoyens et l'accès à l'information bénéficient d'un soutien juridique, par le biais de la législation sur l'accès à l'information, établie pour la première fois au milieu du 18ème siècle, et de l'EIE[65] obligatoire et des audiences locales qui constituent les principaux lieux de participation des citoyens. L'"EIE du siècle" sur le projet de dépôt, en 1997-99, a permis à Posiva d'informer les citoyens, et aux citoyens d'exprimer leurs préoccupations, même si l'EIE n'est que consultative, et qu'un nombre relativement faible de citoyens y ont participé. Cependant, malgré toute sa rigueur, le processus a été épuisant pour les mouvements citoyens impliqués, qui ont eu du mal à trouver le temps et les ressources humaines nécessaires. L'un des principaux opposants à Loviisa a décrit le processus comme un "théâtre" frustrant, chaque partie étant consciente de son rôle dans la pièce, et consciente du fait que le processus n'a aucun impact dans le monde réel. La recherche a en effet confirmé le peu d'impact et le rôle légitimant de l'EIE de dépôt dans la prise de décision, dans le contexte d'asymétries de pouvoir frappantes. Les citoyens ont reproché à l'autorité de coordination de l'EIE, le ministère des affaires économiques et de l'emploi, sa passivité et sa réticence à faire en sorte que le processus respecte non seulement la lettre mais aussi l'esprit de la loi.

La légitimité de l'EIE a été davantage sapée par le fait qu'à travers l'accord de compensation de Vuojoki, Posiva a effectivement choisi Eurajoki comme hôte alors que le processus d'EIE était toujours en cours. Qui plus est, l'accord a été négocié au sein d'un groupe de travail entre les dirigeants municipaux, Posiva et la société d'énergie TVO, "en coulisse" et sans la participation de la communauté locale au sens large.

---

[64] Fennovoima est une compagnie créée par Rosatom (Russie) et des entreprises finlandaises avec pour objet de construire un réacteur de 1200 MW de conception russe. Dans cette optique Fennovoima demandait que les futurs combustibles irradiés de ce réacteur puissent être stockés à Onkalo. Ce projet de réacteur n'a pas eu de suite.

[65] En Finlande, la procédure d'évaluation de l'impact sur l'environnement (EIE) consiste en un programme et la présentation des phases de rapport suivantes. Dans un premier temps, le maître d'ouvrage prépare un programme d'EIE, établissant ce que la procédure d'EIE comprendra et comment elle sera menée. En anglais : EIA, « *Environment Impact Assessment* »).

La participation citoyenne exceptionnellement large et approfondie à l'EIE a donc davantage servi à justifier des décisions déjà prises qu'à permettre aux citoyens d'influencer la décision clé de poursuivre ou non le projet.

Une confiance omniprésente en une « ingénierie honnête »

La confiance omniprésente au sein de la société finlandaise a facilité l'avancement du projet ONKALO. Un pourcentage impressionnant de 82 % des citoyens, tant au niveau national qu'à Eurajoki, font confiance à l'autorité de sûreté nucléaire STUK comme source d'information. Eurajoki a volontairement délégué toutes les analyses de risques à STUK. Bien que méfiants à l'égard des politiciens, les Finlandais ont tendance à faire confiance à l'éthique, à la sincérité et à la compétence des experts, ainsi qu'aux principales institutions responsables de la gestion des déchets nucléaires. Plus fondamentalement, ils affichent ce que l'on pourrait décrire comme une confiance idéologique dans la science, la technologie, l'ingénierie, l'État de droit, l'administration publique et l'alliance entre l'État et l'industrie, qui constituent l'épine dorsale du bien-être socio-économique du pays. Les Finlandais se décrivent souvent comme une "nation d'ingénieurs", qui chérit avant tout les valeurs de rationalité, de pragmatisme, d'honnêteté, de fiabilité et d'orientation vers les résultats. L'absence d'incidents nucléaires significatifs a encore renforcé cette confiance, confortant la perception de la quasi-infaillibilité de "l'ingénieur finlandais".

Le côté sombre du consensus : où est la vigilance civique ?

Non seulement l'expérience finlandaise est spécifique au contexte, mais les niveaux exceptionnellement élevés de confiance ont leur côté sombre : la faiblesse d'une saine méfiance et d'une vigilance civique - piliers fondateurs de la démocratie libérale.

La confiance omniprésente envers les experts, les autorités et l'industrie se traduit par une confiance relativement faible dans la compétence des ONG, en particulier dans le domaine de la politique énergétique, et par la quasi-absence d'une tradition de contre-expertise typique de pays comme la France et l'Allemagne. Cela a également contribué à la passivité des municipalités locales, qui ne sont pas disposées à examiner de manière critique les propositions de l'industrie et leur sécurité. Cela contraste fortement avec la vigilance active exercée par les municipalités d'accueil suédoises, qui ont exploité le pouvoir de négociation que leur confère le veto municipal. De plus, selon les opposants au projet, le consensus apparent au sein de la communauté d'accueil a été en partie obtenu par l'intolérance et l'exclusion sociale envers les critiques, qui ont été poussés à l'exode.

Contrairement à la Suède, l'État ne soutient pas financièrement la vigilance civique des municipalités ou des ONG. En outre, la simplicité et la clarté du processus finlandais d'octroi de licences a un coût : il n'y a pas l'examen multi-perspectif qui caractérise le processus suédois d'octroi de licences à deux voies, qui implique les autorités chargées de l'environnement et de la sécurité nucléaire.

Les médias : chien de garde ou chien de poche ?

Un deuxième signe de l'absence d'une saine méfiance est l'apparente réticence des médias à servir de chien de garde dans le secteur des déchets nucléaires. Depuis les années 1980, les médias finlandais se sont de plus en plus appuyés sur les informations de l'industrie et du gouvernement. Ils ont eu tendance à dépolitiser les débats sur l'énergie et les déchets nucléaires, ne parvenant pas à introduire de nouvelles perspectives et à élucider les choix politiques qui sous-tendent les décisions apparemment techniques. La presse décrit généralement les plans officiels, les calendriers et les choix techniques comme s'il s'agissait d'étapes "naturelles" et prévisibles d'un processus bien géré.

Une étude comparative récente sur les reportages relatifs aux dépôts de déchets nucléaires a montré que le principal journal finlandais, Helsingin Sanomat, avait tendance à reproduire les cadres du gouvernement et de l'industrie, tandis que le journal français Le Monde apparaissait

comme un chien de garde indépendant et un critique du gouvernement et de l'industrie. Le journal finlandais soulignait la forte confiance dans le projet de dépôt du pays, tandis que Le Monde mettait en évidence de multiples incertitudes, telles que celles découlant des relations de confiance problématiques entre les parties impliquées dans le projet français. Le contexte finlandais de confiance élevée sert au mieux d'explication partielle, étant donné qu'une autre étude a identifié une différence similaire avec la Suède, dont la confiance est également élevée. Là encore, la presse finlandaise a répété les points de vue de l'industrie et du gouvernement, alors que les principaux journaux suédois étaient plus ouverts aux points de vue d'un large éventail d'experts et d'ONG. La quasi-absence de débat en Finlande sur le problème de la corrosion du cuivre illustre bien ce point : la presse finlandaise a à peine mentionné les vives controverses scientifiques et publiques en Suède sur le taux de corrosion des conteneurs en cuivre - la barrière technique clé dans le concept d'élimination KBS-3 adopté par les deux pays. Pourtant, en Suède, la "controverse sur le cuivre" a été au cœur du processus d'autorisation et du débat médiatique, considérée comme un obstacle potentiel.

La démocratie minée par une confiance excessive dans l'Etat ?

Enfin, et plus fondamentalement, l'arrangement politique finlandais en matière de gestion des déchets nucléaires se caractérise par une dépolitisation, par laquelle la prise de décision et la vigilance sont déléguées aux institutions étatiques qui jouissent d'une grande confiance. Face à une administration étatique forte, indépendante et de confiance, les partis politiques sont restés de faibles canaux pour l'expression de la diversité des opinions des citoyens. Certains vont jusqu'à évoquer un "Untertanengeist" finlandais, un esprit de soumission résultant d'une longue histoire de domination suédoise, puis russe. Quelles que soient les raisons ultimes, la culture politique finlandaise de l'après-guerre s'est caractérisée par une certaine passivité et une faible légitimité de l'activisme radical des citoyens. Alors que la Suède sert d'exemple de politique consensuelle caractérisée par les valeurs de délibération, de rationalisme, d'ouverture et de consensus, la culture politique finlandaise a été décrite comme moins délibérative et plus permissive envers les solutions autoritaires.

Ce qui est remarquable, c'est que même des membres du "cercle intérieur" du régime nucléaire finlandais, ont récemment évoqué les inconvénients potentiels d'une telle absence de critique. Les vertus incontestables de la prise de décision consensuelle et efficace en matière de gestion des déchets nucléaires en Finlande ont un coût : lorsqu'elle est poussée à l'extrême, la confiance dans les experts, les autorités et l'État peut saper les fondements de la démocratie, même dans une société nordique fondée sur la confiance.

VI. Autres pays

1. Royaume-Uni

Généralités[66]

Le Royaume-Uni est l'un des précurseurs du développement de la technologie nucléaire. Son objectif premier était, dès les années quarante, la production d'armes nucléaires ; c'est sur le site de Sellafield (anciennement Windscale) au nord-ouest de l'Angleterre qu'ont été développées les "piles Windscale" destinées à la production de plutonium à des fins militaires. Ce n'est que plus tard qu'ont été développés des réacteurs à double usage, utilisés à la fois pour la production de plutonium destiné à l'armement et à la production d'électricité.

Le Royaume-Uni a connu trois phases distinctes de développement de réacteurs. La première portait sur le déploiement de la filière Magnox de réacteurs à double usage. Il s'agit de réacteurs fonctionnant à l'uranium naturel, modérés au graphite et refroidis au dioxyde de carbone. Tous sont aujourd'hui fermés. La deuxième phase concernait également des réacteurs graphites-gaz, les AGR, réacteurs avancés refroidis au gaz, qui utilisent maintenant de l'uranium enrichi. Une troisième phase, écourtée, prévoyait l'importation de réacteurs à eau sous pression (REP) ; la construction d'un de ces réacteurs a été achevée en 199767. Au plus fort, les réacteurs nucléaires ont fourni 28 % de la production d'électricité du Royaume-Uni, en 1998, mais cette part a progressivement décliné pour atteindre 21 % en 2017, en raison de la fermeture des anciens réacteurs et de problèmes liés au vieillissement affectant la disponibilité des autres.

Après une longue interruption, il y a actuellement un réacteur en construction, Hinkley Point C, un EPR (réacteur de puissance évolutionnaire) de conception similaire à celle des anciens REP. Si cinq autres nouveaux gros projets pourraient voir le jour, ils sont actuellement remis en question, leurs promoteurs ayant mis un coup d'arrêt, invoquant des problèmes financiers.

Le démantèlement des anciennes installations nucléaires est un processus lent. "Care and Maintenance" est le terme anglais qui désigne l'étape où l'ensemble des bâtiments ont été retirés du site du réacteur, à l'exception du bâtiment réacteur, des structures des bassins et les entrepôts de déchets de faible et moyenne activité (FMA). Ces structures sont alors protégées des aléas climatiques. Il est prévu qu'elles soient démantelées à une échéance de 80 ans environ. Seul un des réacteurs Magnox a atteint l'étape "Care and Maintenance", que devraient atteindre les autres réacteurs d'ici 2029 selon les prévisions de la NDA (Nuclear Decommissioning Authority), Autorité britannique pour le démantèlement nucléaire britannique.

Le Royaume-Uni est doté d'une infrastructure nucléaire diversifiée. Outre les installations destinées à la production d'armes nucléaires, il y a deux surgénérateurs[68]. Plusieurs réacteurs prototypes, et de nombreuses autres installations de recherche. Il n'y a jamais eu d'extraction ou de concentration d'uranium au Royaume-Uni, mais il est doté d'installations couvrant l'ensemble des autres étapes de la chaine du combustible. Cela comprend la conversion, l'enrichissement et la fabrication de combustible, ainsi que le retraitement des combustibles irradiés pour séparer le plutonium et l'uranium.

Il y a deux grosses usines de retraitement à Sellafield. L'une, B205, destinée au retraitement du combustible métallique des réacteurs Magnox, a été ouverte en 1962 et devrait fermer en 2020.

---

[66] Rapport mondial sur les déchets nucléaires, version française 2020 https://fr.boell.org/sites/default/files/2020-11/rapport%20mondial%20sur%20les%20d%C3%A9chets%20nucl%C3%A9aires.pdf

[67] Sur le site de Sizewell : Sizewell B, réacteur PWR de 1198 MW de puissance électrique nette.

[68] Deux petits réacteurs de 11 et 234 MW de puissance électrique nette, à Dounreay, à l'extrême Nord de l'Ecosse, arrêtés définitivement en 1977 et 1994.

L'autre, THORP (Thermal Oxide Reprocessing Plant), a été ouverte en 1994 et fermée en 2022. THORP a retraité des quantités importantes de combustibles étrangers, en particulier japonais et allemands, mais son activité principale est demeurée le retraitement de combustibles AGR appartenant au Royaume-Uni. Elle a fonctionné bien en-deçà de sa capacité. Des difficultés commerciales et techniques ont entrainé sa fermeture. Le Royaume-Uni dispose également d'un entreposage à sec de combustibles irradiés en service à Sizewell, et de sites de stockage pour les déchets de faible activité (FA) à Drigg, près de Sellafield et à Dounreay, en Écosse.

Le site de Sellafield est immense, particulièrement complexe et abrite des centaines de bâtiments et entrepôts désaffectés. Beaucoup reste à faire, ne serait-ce que pour que l'ensemble des déchets soient caractérisés, sans même parler d'être gérés de façon sûre. Comme la plupart des autres pays, le Royaume-Uni envisage de recourir au stockage géologique profond pour les déchets de moyenne et de haute activité (MA et HA), mais n'a fait que peu de progrès à ce jour. La politique de l'Écosse est différente de celle du reste du Royaume-Uni, et prévoit le stockage à faible profondeur de tous les déchets à l'intérieur de ses frontières.

À la recherche d'un site[69]

Les projets de stockage nucléaire dans le nord de l'Angleterre suscitent une opposition locale. Des communautés réagissent avec stupeur à la nouvelle qu'elles sont considérées comme des sites pour des installations souterraines. La bataille de longue haleine pour la construction d'une installation souterraine de traitement des déchets nucléaires dans le nord de l'Angleterre s'est heurtée à de nouveaux problèmes, les communautés ayant réagi avec stupeur à la nouvelle qu'elles étaient considérées comme des sites d'implantation.

La ville portuaire de Hartlepool, dans le nord-est du pays, est l'un des sites pressentis pour accueillir une installation de stockage géologique (GDF [70]), tandis qu'un ancien terminal gazier à Theddlethorpe, près de la côte du Lincolnshire, en est un autre. La région de Cumbria, où la plupart des déchets sont stockés en surface, est également envisagée. Victoria Atkins, ministre du gouvernement et députée de Louth et Horncastle, s'est dite "stupéfaite" par la perspective que sa circonscription puisse accueillir un GDF, affirmant que l'engagement du conseil du comté du Lincolnshire, contrôlé par les conservateurs, auprès du groupe gouvernemental de gestion des déchets radioactifs lui avait été caché.

L'installation est destinée à résoudre le problème de longue date du stockage des déchets nucléaires en fournissant un dépôt sûr pour environ 750 000 mètres cubes de déchets de haute activité à des centaines de mètres sous terre dans des zones dont la géologie est jugée appropriée pour isoler en toute sécurité les matières radioactives. Les déchets seraient solidifiés, emballés et placés dans des voûtes souterraines profondes. Les voûtes seraient ensuite remblayées et le réseau environnant de tunnels et de chambres scellé.

Le Royaume-Uni suivrait l'exemple de la Finlande, où un dépôt géologique pour le combustible nucléaire usé de haute activité est en cours de construction à Olkiluoto. Une poignée d'autres pays envisagent des projets similaires pour tenter de résoudre le dilemme à long terme de la gestion des déchets radioactifs. Entre 70 et 75 % des déchets radioactifs de haute activité du Royaume-Uni, qui seraient destinés à la GDF, sont stockés dans l'installation de Sellafield, dans l'ouest du Cumbria. Ces déchets proviennent notamment de la production d'électricité et d'utilisations militaires, médicales et civiles.

---

[69] Nuclear storage plans for north of England stir up local opposition https://www.theguardian.com/environment/2021/aug/23/nuclear-storage-plans-for-north-of-england-stir-up-local-opposition/

[70] GDF: Geological Disposal Facility (Installation de stockage géologique).

Les traités internationaux existants interdisent aux pays d'exporter les déchets à l'étranger, ce qui conduit certains scientifiques à plaider pour un enfouissement souterrain qui, selon eux, ne nécessiterait plus aucune intervention humaine une fois le stockage terminé.

Les politiciens ont commencé à parler d'une GDF dans les années 1980. Cette dernière tentative nécessiterait une consultation publique et divers niveaux d'approbation, et signifierait que, au plus tôt, les déchets pourraient y être déposés dans les années 2040. Elle résoudrait le dilemme à long terme du stockage des déchets radioactifs "pour une génération", selon le professeur Geraldine Thomas, pathologiste moléculaire à l'Imperial College de Londres, qui siège également au comité gouvernemental de gestion des déchets radioactifs (RWM).

« Les gens pensent parfois que le stockage signifiera que beaucoup plus de déchets seront produits par les nouvelles activités nucléaires. Mais, en réalité, les nouveaux développements nucléaires produisent de moins en moins de déchets. Et nous avons tellement de déchets hérités que nous devons nous y mettre et faire quelque chose rapidement »

Outre les promesses de création d'emplois et d'investissements, des incitations financières d'une valeur de 1 million et 2,5 millions de livres sont proposées aux communautés qui s'engagent dans le processus d'engagement, qui a déjà abouti à des nominations pour deux arrondissements de Cumbria. Des séances d'information sont organisées dans les régions de Copeland et Allerdale par des groupes de travail spécifiques qui contribueraient à la mise en œuvre du GDF.

« Nous essayons d'insister le plus possible sur le fait que l'engagement n'engage pas les communautés à quoi que ce soit et qu'elles peuvent toujours se retirer à un stade ultérieur", a déclaré Steve Reece, responsable du choix des sites au RWM. "Nous le voyons plutôt comme le début d'un long voyage ».

Cependant, les propositions ont suscité un fort sentiment local parmi les dirigeants communautaires et les résidents, et des accusations de secret ont été lancées contre les conseils et le RWM ces dernières semaines.

Dans le nord-est de l'Angleterre, les retombées politiques générées par la nouvelle des discussions "préliminaires" sur le GDF ont provoqué la démission du chef adjoint du conseil de Hartlepool, Mike Young. "*Nous faisons d'énormes progrès à Hartlepool et dans tout Teesside et Darlington*", a déclaré le maire de Tees Valley, Ben Houchen, après la décision. "Et la dernière chose dont nous avons besoin, alors que nous vendons notre région au monde, c'est d'être connus comme le dépotoir des déchets nucléaires du Royaume-Uni". Le conseil du comté de Cumbria, qui a résisté aux derniers efforts pour implanter un GDF localement en 2013, a refusé de prendre part à l'un des deux groupes de travail existants, affirmant que sa participation donnerait au processus "*une crédibilité qu'il ne mérite pas*".

L'opposition des groupes locaux est déjà considérable. "*La grande majorité des gens ici sont horrifiés par le GDF*", a déclaré Jane Bright, une résidente de Mablethorpe et porte-parole de la campagne Guardians of the East Coast. "Je devrais penser qu'elle n'est pas plus bienvenue ailleurs. Mais il y a beaucoup de fierté dans cette région et nous nous battrons contre cela aussi longtemps qu'il le faudra."

Marianne Birkby, une résidente de Cumbria et fondatrice du groupe Radiation-Free Lakeland, a déclaré : "Nous sommes considérés comme la ligne de moindre résistance ici. En Cumbria, nous sommes déjà passés par là. Aujourd'hui, les gens essaient à nouveau de s'y retrouver, en plein milieu d'une pandémie. Cette décharge ferait de nous une zone de sacrifice pour l'industrie nucléaire."

Une nouvelle organisation pour la gestion de déchets radioactifs[71]

Le gouvernement du Royaume-Uni a annoncé le 31 janvier 2022 le lancement de Nuclear Waste Services (*Gestion des déchets radioactifs*). La nouvelle organisation regroupe l'exploitant du site Low Level Waste Repository Limited (*Société exploitant le stockage des déchets de faible activité*), le promoteur de l'installation de stockage géologique Radioactive Waste Management Limited (*Projet de stockage géologique profond*) et le programme de gestion intégrée des déchets de la *Nuclear Decommissioning Authority*, NDA (*Autorité responsable du démantèlement des centrales, usines et installations de recherche nucléaires*).

Selon le gouvernement britannique, Nuclear Waste Services maintiendra les engagements actuels envers le dépôt de déchets de faible activité de West Cumbria, le programme d'installations de stockage géologique et les communautés concernées, tout en créant une entreprise capable de gérer les déchets nucléaires britanniques "de manière sûre et sécurisée pour les générations à venir".

La NDA a annoncé en janvier 2021 son intention de créer une division unique des déchets afin de rassembler son expertise en matière de gestion des déchets, "ce qui nous permettra d'accroître nos capacités, de simplifier notre mode de fonctionnement et d'offrir une plus grande valeur au contribuable". La NDA est responsable de la gestion, du déclassement et du nettoyage de 17 sites nucléaires à travers le Royaume-Uni. Nuclear Waste Services supervisera le programme intégré de gestion des déchets de la NDA.

Leadership : Nuclear Waste Services sera dirigé par le directeur général, Madame Corhyn Parr, anciennement directeur des déchets intégrés de la NDA, et la présidente du conseil d'administration, Madame Adrienne Kelbie.

« Notre nouvelle organisation rassemble une énorme quantité d'expertise et de capacités dans le traitement des déchets radioactifs à travers le Royaume-Uni", a déclaré Parr. "En travaillant plus étroitement ensemble, nous pouvons permettre une meilleure prise de décision et aider à identifier les opportunités qui peuvent apporter des avantages plus larges, comme une réduction plus précoce des risques sur les sites de déclassement ou une plus grande efficacité et des coûts plus faibles pour le contribuable. »

Le portefeuille de Nuclear Waste Services comprend des programmes d'investissement majeurs, notamment le développement d'une installation de stockage géologique, les opérations et services liés aux déchets, ainsi que le programme de gestion intégrée des déchets de la NDA.

Éventuel nouveau programme nucléaire et déchets

Malgré les déboires, les retards et l'augmentation des coûts de la construction par EDF Energy de deux EPR à de Hinkley Point, le gouvernement veut construire de nouveaux réacteurs, en particulier sur le site de Sizewell. La question de la production de nouveaux déchets dans une situation déjà tendue et incertaine dans ce domaine est de plus en plus cruciale. D'après « Energy News » du 5 avril 2022, dans le cas où l'installation d'u stockage géologique profond serait validée (*ce qui est très loin d'être acquis*), sa construction ne serait pas immédiate : « les déchets ne seraient stockés que dans plusieurs années, probablement en 2150.

De son côté, le Professeur Stephen Thomas, spécialiste de la politique de l'énergie à l'Université de Greenwich, déclare :

« Malgré 65 ans d'utilisation de l'énergie nucléaire en Grande-Bretagne, il nous manque encore, au mieux, des décennies pour disposer d'installations permettant d'éliminer les déchets en toute sécurité. Tant que nous ne savons pas que cela peut être fait, il est prématuré de se lancer dans un nouveau programme majeur de centrales nucléaires ».

---

[71] U.K. launches new radioactive waste management organization, https://www.ans.org/news/article-3622/uk-launches-new-organization-to-manage-its-radioactive-waste/



Figure 44 : Le site d'entreposage des déchets nucléaires à Sellafield

2. Chine

La Chine est devenue en 2022 le second producteur d'électricité d'origine nucléaire au monde, après les Etats-Unis et devant la France.

Ce pays a développé dès les années cinquante le nucléaire militaire et, comme les autres pays désirant se doter de l'arme nucléaire, la production de plutonium à partir des combustibles irradiés a été développée d'abord pour les besoins militaires, puis comme combustible de base d'un programme de développement des surgénérateurs.

La production électronucléaire et son évolution[72]

La Chine continue de développer son secteur de l'énergie nucléaire, bien qu'à un rythme beaucoup plus lent que le secteur renouvelable de la nation. À la mi-2020, la Chine comptait 47 réacteurs en service, pour une capacité de production totale de 45,5 GW. En outre, le réacteur expérimental rapide de 20 MW de la Chine est en cours de construction.

En 2019, l'énergie nucléaire a contribué à la production de 330 TWh d'électricité, ce qui constituait 4,9 % de toute l'électricité produite en Chine. Ces chiffres ont augmenté par rapport à l'année précédente, respectivement de 53,1 TWh (+19,2 %) et de 0,7 point de pourcentage.

Malgré cette augmentation, une profonde incertitude semble planer sur l'avenir de l'énergie nucléaire en Chine. Nuclear Intelligence Weekly (NIW) a rapporté en juillet 2020 que « *l'autorité suprême de la Chine, le Conseil d'État, n'a presque rien mentionné au sujet des nouvelles constructions dans son plan de travail gouvernemental ; tandis que l'Administration nationale de l'énergie (AEN) n'a fourni aucun détail sur les nouvelles constructions nucléaires dans ses récents avis directeurs sur le travail énergétique national de 2020, contrairement aux années précédentes* ».

Toutes les centrales électronucléaires sont implantées sur la côte Est de la Chine, très peuplée, et tous les réacteurs sont de la filière à uranium enrichi et eau sous pression (REP ou PWR).



Figure 45 : Les centrales nucléaires en Chine

[72] Référence : WNISR 2022 (World nuclear industry status report), pages 124 à 130.

La politique de production et de recyclage du plutonium

La Chine a choisi une politique de retraitement des combustibles irradiés pour la production du plutonium et l'utilisation de celui-ci comme combustible pour de futurs surgénérateurs. Le premier prototype expérimental à neutrons rapides (en vue de la surgénération) de 65 MW de puissance électrique nette a été couplé au réseau en 2011 et le réacteur de démonstration CFR[73]-600 a débuté sa construction en 2017.

Dans la même ligne qu'en France, faute de surgénérateur, la politique consiste à fabriquer des combustibles MOX (mélange d'oxydes d'uranium appauvri et de plutonium) à charger dans les réacteurs REP en fonctionnement.

Actuellement, la Chine exploite, une usine de retraitement pilote d'une capacité de seulement 200 tonnes de combustibles irradiés par an. Le plutonium ainsi séparé est entreposé pour être utilisé ensuite et les déchets de haute activité à vie longue (produits de fission et actinides mineurs), conservé jusqu'ici dans des cuves seront vitrifiés dans une nouvelle installation qui a démarré en 2021. L'accord signé en 2018 entre Orano (France) et CNNC (Chine), confirmé au niveau des deux gouvernements en 2019 semble bien en train d'être rompu.

L'entreposage des combustibles irradiés

Dans cette situation de blocage, les combustibles irradiés sont entreposés d'abord dans les piscines des réacteurs, puis dans des entreposages à sec sur le site de la centrale (figure ci-dessous). Un entreposage centralisé en piscines existe également dans le complexe nucléaire de Lanzhou.



Figure 46 : Le combustible usé doit être entreposé sur le site dans des conteneurs protégés et ventilés en attendant l'achèvement de l'installation de recyclage et de retraitement du combustible usé de la Chine.

Un laboratoire de recherche sur le stockage géologique profond[74]

La Chine a commencé à construire son premier laboratoire de recherche souterrain dans le désert de Gobi, afin de déterminer si la région convient au futur stockage géologique des déchets

[73] CFR : China Fast Reactor.

[74] https://www.iaea.org/newscenter/news/china-begins-construction-of-its-first-underground-research-laboratory-for-high-level-waste-disposal

radioactifs de haute activité (DHA), y compris le combustible nucléaire usé, produits par les 51 centrales nucléaires chinoises en activité. Sa construction fait suite à plus de trois décennies de recherches menées avec le soutien de l'AIEA. Les scientifiques utiliseront le laboratoire pour caractériser et évaluer les caractéristiques géologiques, hydrologiques, géochimiques et techniques des roches du site.

La Chine travaille à l'identification d'un site approprié pour un dépôt de déchets de haute activité depuis 1985, et depuis 1999, ces efforts sont soutenus par l'AIEA. "*L'élimination sûre des déchets radioactifs de haute activité est l'une des missions essentielles pour le développement durable de l'industrie nucléaire chinoise*", a déclaré Liang Chen, vice-président de l'Institut de recherche en géologie uranifère de Pékin (BRIUG), qui construit le laboratoire de recherche souterrain. La stratégie du pays en matière d'élimination des déchets de haute activité comprend trois étapes, la première - études en laboratoire et sélection préliminaire du site - devant être achevée en 2020. La deuxième étape, les essais souterrains in situ, devrait se dérouler de 2021 à 2050, après la construction du laboratoire de recherche souterrain. La dernière étape - la construction de l'installation de stockage - devrait avoir lieu entre 2041 et 2050, si les tests in situ confirment que la zone est appropriée.

Remarque

Les prévisions de l'AIEA semblent bien optimistes…

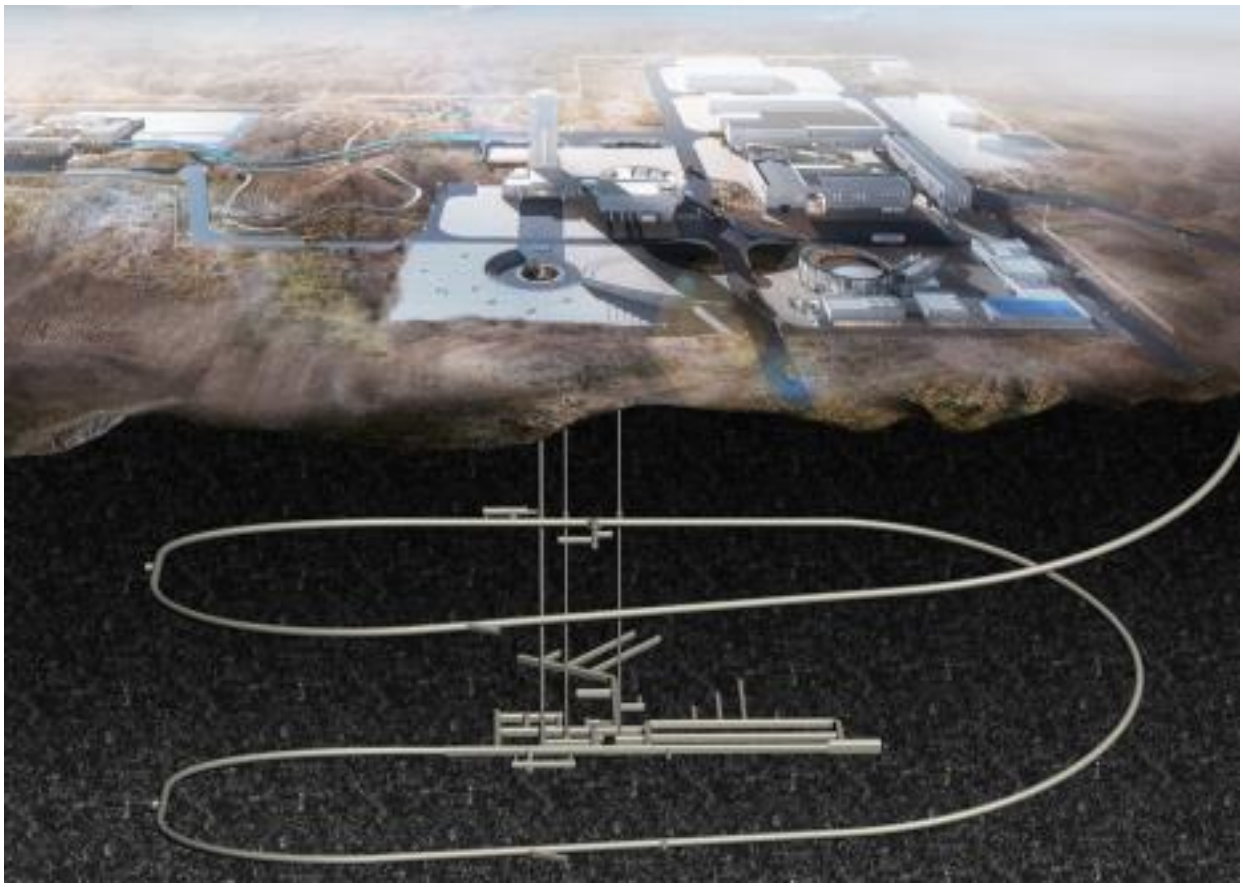


Figure 47 : Esquisse du projet de laboratoire de recherche dans le désert de Gobi

3. Allemagne

Généralités[75]

La République fédérale d'Allemagne (RFA) et la République démocratique allemande (RDA) ont toutes deux mis en place un programme de recherche nucléaire en 1955. L'Allemagne de l'Ouest a développé son programme nucléaire suivant deux voies parallèles : une basée sur une filière de réacteurs de conception allemande, l'autre sur le recours à la technologie américaine. Le premier réacteur nucléaire de la première centrale, VAK Kahl, a été commandé en 1956. À la fin des années quatre-vingt, la RFA comptait 19 réacteurs en service, assurant tous les ans quelques 30 % de la production nette d'électricité du pays.

Dans le même temps, l'Allemagne de l'Est était approvisionnée par l'Union soviétique. En 1966, elle couplait au réseau son premier réacteur pilote à Rheinsberg. À l'origine, les plans du gouvernement de la RDA prévoyaient la construction de 20 réacteurs à l'horizon 1970, mais seule la construction de cinq réacteurs à Greifswald a été achevée. En 1990, dans le contexte de l'unification, le gouvernement allemand a décidé de fermer l'ensemble des réacteurs de conception soviétique. Il s'agissait principalement d'une question d'ordre économique : avec la Loi atomique allemande nouvellement entrée en vigueur, la poursuite de l'exploitation leur aurait imposé de se conformer à de nombreuses exigences de sûreté.

Au début des années 2000, la coalition SPD-Verts était parvenue à un compromis avec les exploitants sur l'abandon du nucléaire. Cet accord de compromis, promulgué en loi en 2002 (Loi de sortie du nucléaire), limitait la durée de vie des réacteurs à l'équivalent de 32 ans de production d'électricité environ (allocation en kilowattheures). La loi interdisait totalement la construction de nouveaux réacteurs. À l'automne 2010, la coalition Conservateurs-Libéraux démocrates infirmait la sortie du nucléaire et allongeait la durée d'exploitation de 8 à 14 ans en fonction du type de réacteur. Ces prolongements n'ont cependant tenu qu'une année. En 2011, trois mois après l'accident de Fukushima, le parlement allemand adoptait, avec un large soutien sur l'ensemble du spectre politique, la loi sur l'énergie nucléaire (AtG) avec pour effet la suspension instantanée des autorisations de fonctionnement de huit réacteurs. En octobre 2022, trois réacteurs restent en fonctionnement, dont deux pourraient obtenir une prolongation limitée en 2023.

En 2019, seuls trois prototypes relativement petits avaient été démantelés jusqu'au stade du "retour à l'herbe" (greenfield). Deux réacteurs de plus grande puissance ont été complètement démantelés, mais, des déchets nucléaires étant encore entreposés dans certaines parties des bâtiments, aucun de ces sites ne peut être libéré du contrôle réglementaire.

Contrairement à l'Allemagne de l'Est, l'Allemagne de l'Ouest n'a jamais exploité de mine d'uranium. Elle dispose toutefois d'une usine d'enrichissement de l'uranium à Gronau et d'une usine de fabrication de combustible à Lingen. L'usine de Gronau est exploitée par une filiale d'URENCO. Un tiers de ses parts est détenu par les compagnies d'électricité allemandes Preussen Elektra et RWE, un tiers par le gouvernement britannique, et un tiers par le gouvernement néerlandais. À Lingen, Framatome (via sa filiale Advanced Nuclear Fuel GmbH) produit des assemblages combustibles, ainsi que de la poudre et des pastilles de combustible qui approvisionnent l'ensemble des usines de fabrication de Framatome. Dans les années soixante-dix, il y avait des projets de complexe de stockage des déchets à Gorleben, comprenant entre autres une usine de retraitement, des installations de fabrication de combustible, et des installations destinées au stockage des différents types de déchets, dont un site de stockage profond dans une mine de sel. La plupart de ces projets ont été suspendus avant d'être finalement abandonnés. L'exploration en surface puis

[75] Rapport mondial sur les déchets nucléaires, version française 2020 https://fr.boell.org/sites/default/files/2020-11/rapport%20mondial%20sur%20les%20d%C3%A9chets%20nucl%C3%A9aires.pdf

en profondeur (à partir de 1979 et 1986 respectivement) du dôme de sel et son évolution en mine pilote, ainsi que l'accumulation d'un inventaire de haute activité dans l'installation d'entreposage temporaire ont tout de même fait de Gorleben un site essentiel pour la gestion des déchets.

De Gorleben à Asse

Gorleben[76]

En février 1977, le président de l'Etat de Basse-Saxe, Ernst Albrecht (Parti Conservateur) annonçait la décision de la construction d'une installation de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde sur le territoire de la commune de Gorleben, proche de la frontière avec l'Allemagne de l'Est.

Les habitants n'ont jamais accepté cette décision, arguant que le sel de la couche géologique choisie risquait de fragiliser les structures de confinement et de provoquer des fuites radioactives.

Gorleben devint le point de mire du mouvement antinucléaire allemand. Les manifestants ont organisé des sit-in sur le site de construction et les voies de chemin de fer et ont rallié la communauté agricole de la région. Les années suivantes, chaque transport de déchets nucléaires vers Gorleben s'est accompagné de grandes manifestations.

Malgré ces protestations massives, les travaux de construction d'une nouvelle mine y ont débuté, dans laquelle les caractéristiques géologiques du dôme de sel devaient être explorées. Cette mine, qui n'a jamais produit un grain de sel ni aucune autre ressource naturelle, a déjà coûté au contribuable allemand 1,6 milliard d'euros (1,9 milliard de dollars). Tant d'argent a été dépensé pour effectuer des recherches inutiles : l'annonce par Stefan Kanitz, directeur de la « Société fédérale pour un stockage profond des déchets radioactifs » (BGE) que la couverture superficielle du dôme de sel n'est pas intacte et que la composition chimique de la nappe phréatique est inadaptée, constitue une véritable bombe politique. C'est exactement ce que les opposants à l'énergie nucléaire disaient depuis des années.



Figure 48 : Le stockage de Asse

[76] https://www.dw.com/en/germany-launches-new-search-for-permanent-nuclear-waste-disposal-site/a-55077967

Asse[77]

En 1965, l'extraction de sel de potasse dans l'Asse s'est arrêtée. Après son arrêt, les déchets nucléaires y ont été officiellement déposés à des "fins de recherche" jusqu'à la fin des années 1970. Mais en réalité, la mine était un dépôt.

Et l'installation est délabrée depuis longtemps ; de l'eau s'écoule dans les tunnels, quelque 13.000 litres chaque jour.

Il a été décidé que les barils devaient être récupérés dans la mine, et personne ne veut risquer l'effondrement complet des puits, ce qui signifierait que les déchets pourraient entrer en contact avec les eaux souterraines. Il s'agit d'un projet d'un milliard de dollars. Toutefois, de nombreux experts doutent que l'extraction des barils des anciens puits puisse être menée à bien.

Une nouvelle mine pour nettoyer l'ancienne.

La Société fédérale allemande pour l'élimination des déchets radioactifs (BGE), fondée en 2016, est responsable de la mine et de la récupération des déchets. L'un de leurs experts est l'ingénieur des mines Thomas Lautsch : "*Nous devrions construire une mine d'extraction, ce qui ne se limite pas à un nouveau puits. Nous aurions également besoin d'une installation de stockage provisoire pour les déchets, et nous devrions créer de nombreux nouveaux puits pour accéder aux différentes chambres*."

Lautsch ajoute que la phase de construction de ce projet prendra facilement huit ou neuf ans. "*Vers 2024, nous devons commencer la construction*". Les anciens puits et les chemins horizontaux dans la montagne ne répondent pas aux normes légales actuelles sur les matières nucléaires.

Cela signifie qu'une toute nouvelle mine devra être construite autour de l'ancienne, simplement pour récupérer les barils. Si tout se passe comme prévu, la récupération pourrait commencer en 2033.

C'est au cours des prochaines années que l'on verra si une extraction sûre et réussie est possible ou non. Toutes les personnes concernées espèrent toujours le meilleur.

A la recherche d'un site[78]

L'Allemagne a publié une liste de sites de stockage potentiels pour les déchets radioactifs. Cette liste, établie par l'organisation de gestion des déchets Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), fait suite à l'approbation par le Parlement, il y a trois ans, d'une recherche scientifique d'un site. Elle identifie 90 zones couvrant 54% de la surface du pays comme potentiellement géologiquement appropriées.

Le site permettrait de stocker environ 1 900 conteneurs de déchets, qui représentent 5 % du total des déchets nucléaires de l'Allemagne mais 99 % de leur radioactivité. Une décision finale est prévue pour 2031, l'objectif étant de commencer à utiliser le site sélectionné en 2050.

Le président de BGE, Stefan Studt, a déclaré dans une déclaration accompagnant la publication de la liste "Les chances de trouver en Allemagne un site pour un dépôt de déchets hautement radioactifs offrant une sécurité pour un million d'années sont très bonnes. C'est ce que montrent les 90 sous-zones réparties dans tout le pays. »

BGE précise que les sous-zones sont réparties dans tous les États fédéraux du pays, à l'exception de la Sarre. Dans l'argile, BGE a identifié neuf sous-zones d'une superficie de près de 130 000 kilomètres carrés. En ce qui concerne le sel gemme, 74 sous-zones d'une superficie d'un peu plus

---

77 https://www.dw.com/en/nuclear-waste-in-disused-german-mine-leaves-a-bitter-legacy/a-47420382

78 https://www.world-nuclear-news.org/Articles/German-lists-potential-radwaste-storage-sites

World Nuclear News (WNN), 26 septembre 2020.

de 30 000 kilomètres carrés ont été identifiées. Parmi celles-ci, 60 sous-zones sont situées dans des formations abruptes de sel gemme (dômes de sel) et 14 sous-zones dans des formations stratiformes (formations de sel gemme plates). Sept sous-zones d'une superficie de près de 81 000 kilomètres carrés sont situées dans des roches hôtes cristallines.

Stefan Kanitz, qui est responsable de la sélection du site par la direction de BGE, a déclaré : "La taille des sous-zones montre bien que nous sommes encore loin de prendre une décision préliminaire sur un site. Nous nous réjouissons maintenant de discuter avec les citoyens et le public spécialisé de nos résultats, de nos méthodes d'application des critères de la loi sur la sélection des sites et de travailler à de nouvelles tâches avec notre équipe de scientifiques engagés. »

Le rapport a exclu un site situé dans une ancienne mine de sel à Gorleben qui était auparavant considéré comme approprié, en partie à cause d'un risque potentiel d'érosion, a déclaré BGE.

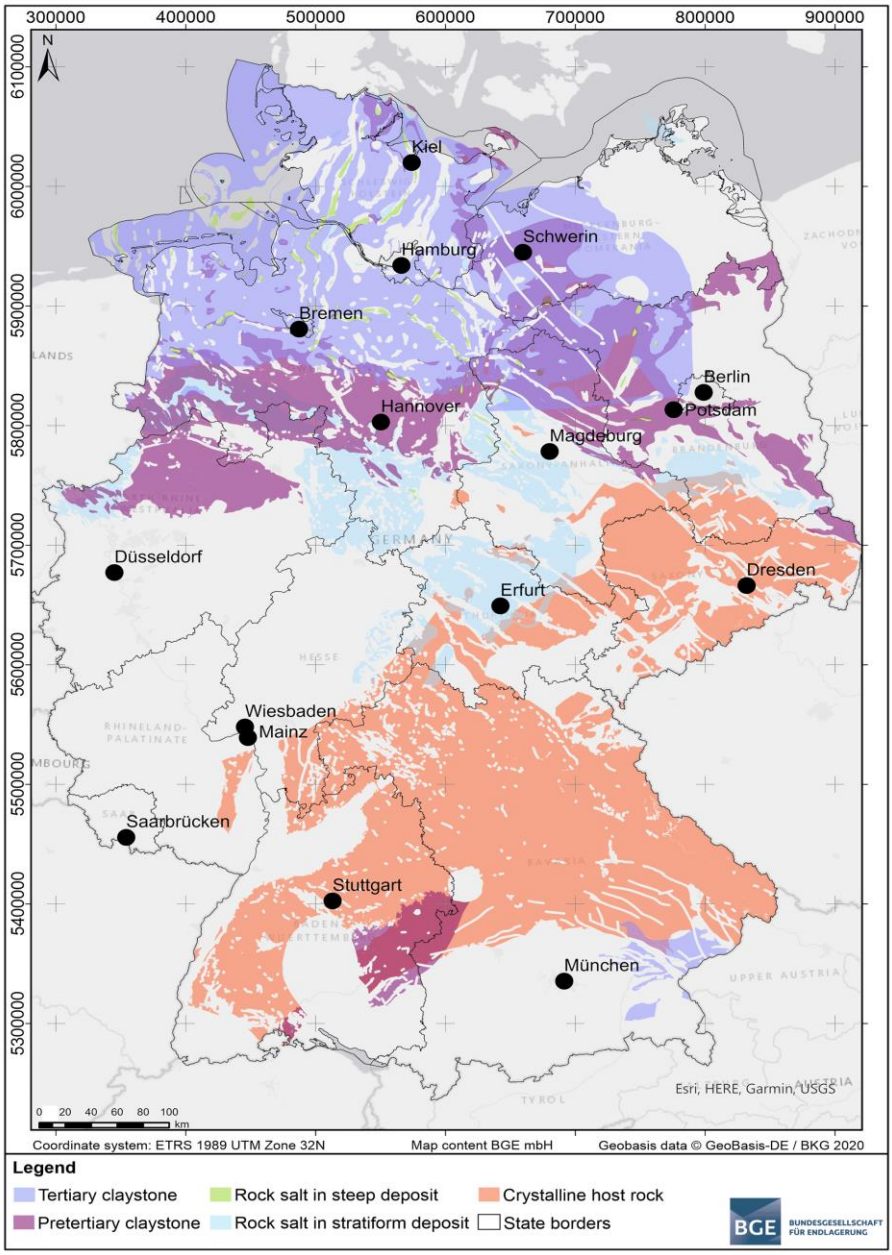


Figure 49 : Zones potentielles de stockage géologique profond

En bleu les argiles tertiaires, en violet les argiles prétertiaires, en vert pâle les couches de sels dans dépôt à forte pente, en bleu clair les couches de sels dans dépôt stratifié, en rose les roches granitiques.

Commentaire dans le journal Reporterre [79]

« Mais tout le monde ne joue pas le jeu, loin de là. La Bavière, première région allemande à inaugurer une centrale nucléaire en 1961, refuse purement et simplement les recherches, jugeant qu'elle « n'est pas un lieu de stockage adapté pour les déchets radioactifs ». D'autres régions, comme la Saxe-Anhalt, où se trouve le site de Morsleben, mais aussi la Basse-Saxe, où se trouvent Gorleben, Asse et Konrad, ou encore la Rhénanie-Palatinat, à la frontière avec la France, rechignent à confier leurs données géologiques à la BGE. Les compagnies minières privées leur ont également adressé une fin de non-recevoir, au nom du secret des affaires.

Pour y remédier, le ministère fédéral de l'Énergie a promis de réformer la législation, mais le texte a déjà été repoussé et ne devrait pas être examiné par le parlement avant 2019. De plus, il imposerait l'examen des requêtes au cas par cas, ce qui fait bondir la BGE : « Cela n'est pas réalisable compte tenu du grand nombre de données et de l'incertitude concernant les droits des tiers », s'inquiète l'organisme dans un communiqué.

Du côté des autorités comme des associations, plus personne ne semble croire que la mission sera menée à bien, alors qu'elle vient à peine de commencer. « Il est presque illusoire de penser qu'un site sera trouvé d'ici 2031, juge Thorben Becker, de l'ONG environnementale Bund. Nous considérons que le calendrier est dangereux, car les contraintes de temps pourraient finalement conduire à une simplification de la procédure. »

Comprenez : à revenir au choix initial de Gorleben, malgré les risques environnementaux et l'opposition de la population. »

[79] https://reporterre.net/En-Allemagne-la-gestion-des-dechets-radioactifs-dans-l-impasse

Reporterre, Violette Bonnemas, 24 janvier 2019

4. Japon

La situation énergétique[80]

Depuis l'accident de Fukushima Daïchi en mars 2011, le Japon a entrepris des réformes énergétiques importantes, indique l'AIE qui souligne entre autres une libéralisation des marchés de l'électricité et du gaz naturel. Le pays, qui a réduit sa consommation énergétique de 16% entre 2010 et 2019, a réalisé « de réels progrès vers un système énergétique plus efficace, résilient et durable » durant la dernière décennie, ajoute l'AIE.

Cette diversification reste toutefois très limitée : les énergies fossiles (issues pour la quasi-totalité des importations) comptaient encore pour 88% de la consommation d'énergie primaire du pays en 2019 selon les dernières données de l'AIE. Et l'arrêt du parc nucléaire japonais après l'accident de Fukushima a « rendu le Japon plus dépendant des combustibles fossiles pour combler la perte de production électrique » (le nucléaire comptait pour près de 15% de la consommation d'énergie primaire avant l'accident de Fukushima, cette part a chuté à 4% en 2019. Le Japon est le premier importateur mondial de gaz naturel liquéfié (GNL).

Malgré le développement des différentes énergies renouvelables, celles-ci ne comptaient encore que pour 8% de la consommation d'énergie primaire en 2019. Les émissions japonaises de CO2 liées à l'énergie ont atteint un pic en 2013 avant de chuter « grâce au développement des énergies renouvelables, au redémarrage de quelques réacteurs nucléaires et à des gains d'efficacité énergétique ». Ces émissions sont, en 2018, retombées au niveau de 2009.

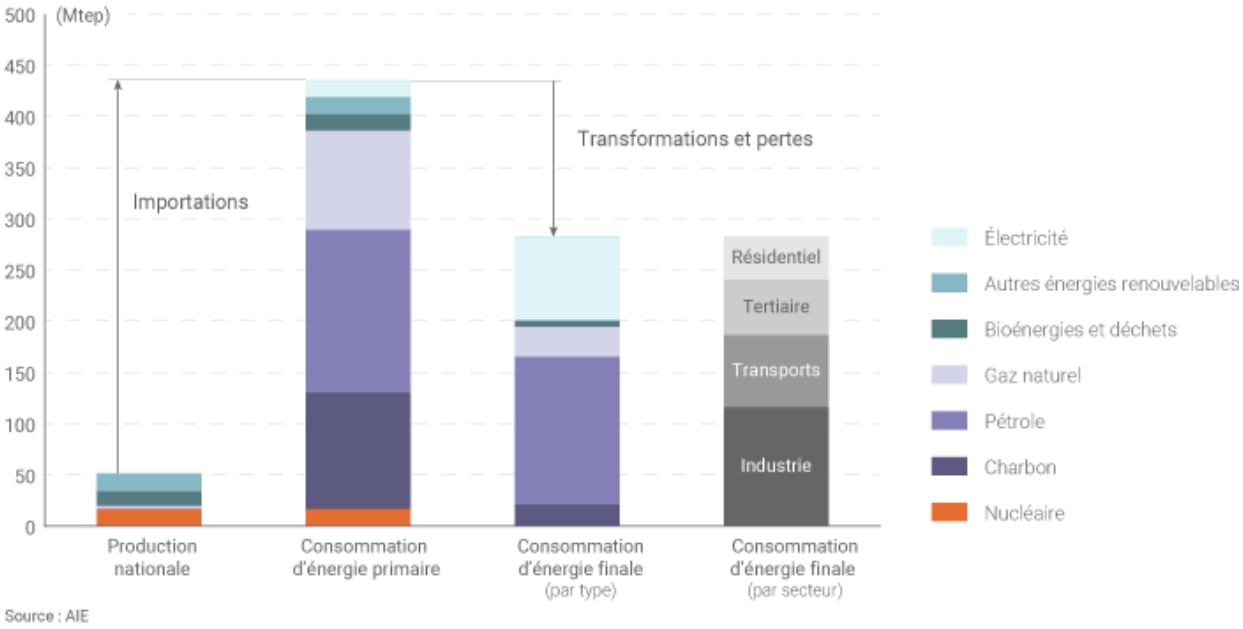


Figure 50 : Production et consommation d'énergie primaire du Japon en 2019, AIE

Commentaire : La comptabilité énergétique en énergie primaire donne une fausse idée de la comparaison entre la production d'électricité d'origine nucléaire pour laquelle on compte la production de chaleur dans les réacteurs qui aboutit à une production d'électricité trois fois

[80] https://www.connaissancedesenergies.org/la-situation-energetique-du-japon-decryptee-par-laie-220218/

moindre, et la production d'électricité par les énergies renouvelables non thermiques (essentiellement éolien et photovoltaïque) pour lesquels c'est l'électricité produite qui est comptabilisée en énergie primaire. La comparaison doit donc se faire aussi sur la contribution de chacune de ces sources à la consommation finale d'électricité.

L'électricité au Japon

- Production totale (en 2019) : 1045 TWh, dont : gaz naturel 385 TWh (37%) ; charbon 329 TWh (32%) ; hydroélectricité 87,3 TWh (8%) ; solaire 69,0 TWh (7%) ; nucléaire 63,8 TWh (6%) ; biocarburants et déchets 44,6 TWh (4%) ; pétrole 36,1 TWh (3%) ; éolien 7,7 TWh.
- Bilan import/export : Importations et exportations nulles.
- Consommation totale : 928 TWh
- Consommation par habitant : environ 7300 kWh en 2019

Les combustibles fossiles utilisés pour produire plus de 70% de l'électricité japonaise sont importés.

L'électronucléaire au Japon[81]

Le premier réacteur nucléaire commercial a commencé à fonctionner à la mi-1966, et l'énergie nucléaire est une priorité stratégique nationale depuis 1973. Cette priorité a été remise en question après l'accident de Fukushima en 2011, mais elle a été confirmée.

Jusqu'en 2011, le Japon produisait environ 30 % de son électricité à partir de ses réacteurs et ce chiffre devait passer à au moins 40 % d'ici 2017. Il est désormais prévu qu'il en produise au moins 20 % d'ici à 2030, à partir d'un parc épuisé après l'accident de Fukushima en 2011.

Les deux premiers réacteurs ont redémarré en août et octobre 2015, et huit autres ont redémarré depuis. Seize réacteurs sont actuellement en cours d'approbation de redémarrage. Les réacteurs sont des filières PWR ou BWR (Fukushima Daïchi avait 4 réacteurs BWR).

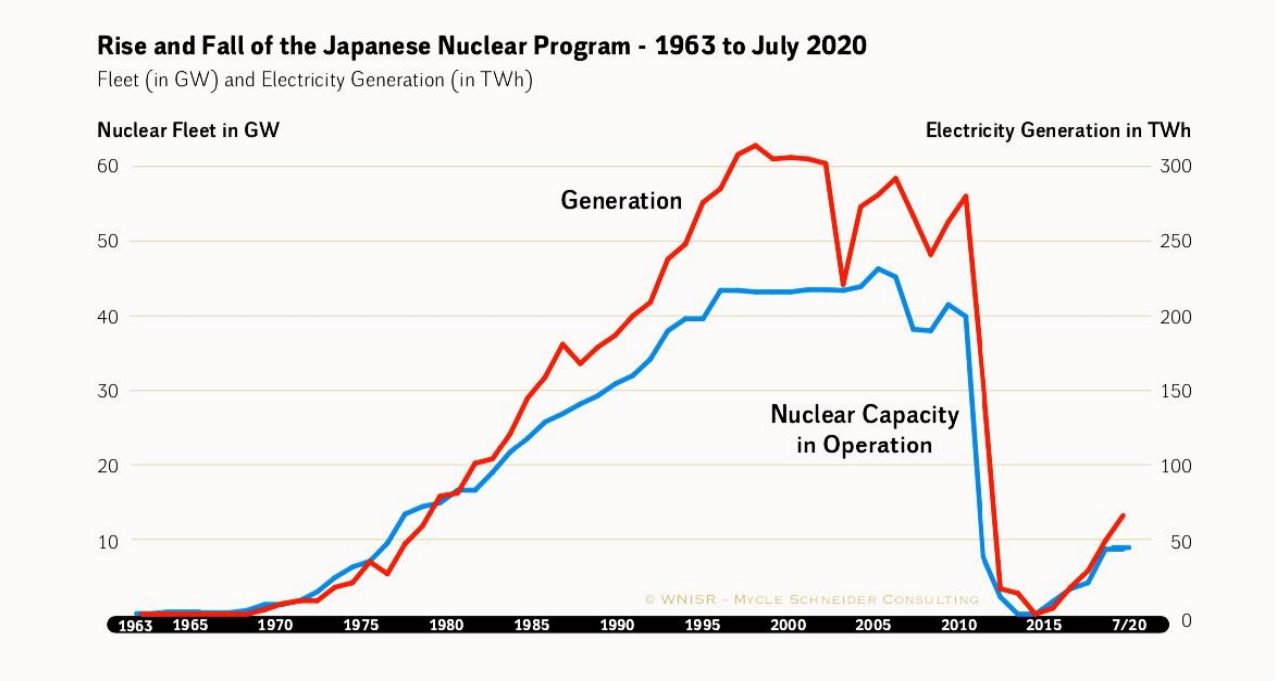


Figure 51 : Evolution du programme nucléaire du Japon de 1963 à Juillet 2020
En rouge : évolution de la production d'électricité d'origine nucléaire
En bleu : évolution de la puissance électrique des réacteurs en fonctionnement.

81 https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-fuel-cycle.aspx

Sur le caractère « national » du développement de l'énergie nucléaire au Japon, assez comparable à cet égard avec la position officielle de la France depuis la Seconde Guerre mondiale, on lira avec profit l'article remarquable de Masatoshi Inoue[82] dont voici le résumé :

« Depuis les années 1950, le Japon poursuit activement son développement électronucléaire, bien que ce pays ait directement connu des catastrophes causées par l'atome militaire et civil. Afin d'expliquer cette « obstination » pour l'atome, cet article propose une nouvelle synthèse des trajectoires nucléaires dans l'archipel, en distinguant trois étapes dans l'évolution des ambitions techno-politiques (importations, appropriation/invention, exportation). Ainsi, il se focalise sur la façon dont les promoteurs japonais ont rendu l'énergie nucléaire indispensable pour le « progrès » national. Cette approche nous permet de mettre en lumière les efforts des défenseurs à sans cesse renouveler les formes d'attachement de la nation nipponne à l'atome à travers divers projets technologiques. Dans ce cadre, les expériences des désastres leur ont servi d'outils pour revendiquer la légitimité « japonaise » à promouvoir l'atome ».

Combustibles irradiés et retraitement

De façon à nouveau comparable à celle de la France, le Japon a basé sa politique de gestion des combustibles irradiés sur le retraitement pour la production du plutonium avec en ligne de mire le développement des surgénérateurs.

Le prototype de surgénérateur Monju, après de nombreux déboires et un « incident » grave en 2011 (fuite de sodium), a été définitivement arrêté en 2016. L'usine de retraitement des combustibles irradiés, située à Rokkashomura construite à partir de 1993 n'a jamais fonctionné et sa mise en service industriel est problématique. Son coût est passé de 6 milliards d'euros annoncés à 23 milliards en 2018.

Le Japon a donc été conduit à faire retraiter ses combustibles en France (La Hague, 4193 tonnes) et au Royaume-Uni (Sellafield, 2944 tonnes). En France, la période de retraitement de ces combustibles a duré de 1981 à 1998. L'expédition au Japon des déchets vitrifiés s'est achevée en 2007. Les déchets vitrifiés contenant les produits de fission et les actinides mineurs sont renvoyés au Japon. Le cas du plutonium est plus délicat. Une partie peut être renvoyée sous la forme de combustibles MOX mais il reste encore 36 tonnes de plutonium japonais en attente au Royaume-Uni et en France. Au Japon, les combustibles irradiés qui ne sont donc plus retraités s'accumulent dans les piscines des réacteurs qui arrivent à saturation et dans celles du site de Rokkasho.

Un entreposage centralisé en piscine a été construit à Mutsu, dans la province d'Aomori, dont le dossier de sûreté vient d'être validé. Mais le maire de Mutsu est contre car il craint (avec raison) que cet entreposage dure beaucoup plus longtemps que ce qui a été prévu initialement.

Vers un stockage géologique profond ?

Les déchets de haute activité s'accumulent : déchets vitrifiés et combustibles irradiés, y compris les MOX. Sans surprise, le Gouvernement et les exploitants des centrales nucléaires ont choisi le stockage géologique comme solution pour un stockage définitif.

Deux obstacles majeurs :

1. Le Japon est régulièrement frappé par des séismes. Failles actives, séismes, volcans, beaucoup d'eaux souterraines… Le Japon n'est vraiment pas le lieu le plus propice pour y enterrer des déchets nucléaires.
2. Deux petites villes côtières, Suttsu et Kamoneai de Hokkaido, de la vaste île septentrionale du Japon, se sont portées candidates en 2020, contre l'avis d'une partie des habitants. Plusieurs

[82] Imagining the « Japanese » Nuclear Program, Masatoshi Inoue https://journals.openedition.org/artefact/10405

villes des environs ont voté une résolution interdisant le passage des déchets radioactifs sur leur territoire.



Figure 52 : Les sites envisagés au Japon

Conclusion

Les gouvernements des pays étudiés, ainsi que l'Agence internationale pour l'énergie atomique (AIEA), ont choisi comme solution préférée (ou dite « de référence ») le stockage en couche géologique profonde pour accueillir les déchets de haute activité à vie longue provenant des réacteurs électronucléaires (combustibles irradiés et déchets vitrifiés le cas échéant).

Ce choix a été fait a priori pour sa facilité apparente et l'intérêt pour les producteurs de déchets, non pas de les éliminer mais de les « faire disparaître » prétendument. Il est en effet essentiel pour eux de pouvoir annoncer que « le problème des déchets nucléaires est réglé », même si l'on est loin du compte. Si le schéma général est sensiblement le même, il y a des différences importantes dans sa mise en œuvre selon que l'on retraite les combustibles irradiés ou qu'on les garde en l'état, selon le type d'entreposage pérenne l'on met en œuvre ou envisage, selon, dans le cas d'un stockage géologique profond, la nature de la couche géologique choisie ou soumise à la recherche, sur les caractéristiques de l'exploitation éventuelle d'un tel stockage, etc.

Au-delà de ces questions, ce qui nous a particulièrement intéressés c'est la façon dont les décisions sont prises, quelles sont les responsabilités des différents acteurs (Gouvernement, Parlement, autorités de contrôle, autorités régionales ou locales, entreprises, associations, citoyens) ; y a-t-il une participation réellement prise en compte des citoyens à la prise de décision ?

Nous avons placé les Etats-Unis en tête de ce rapport car le développement du nucléaire, que ce soit à des fins militaires ou civiles, est parti de ce pays et que les filières de réacteurs électronucléaires qui s'y sont développées, à uranium enrichi et eau, sont très largement majoritaires au niveau mondial. Les Etats-Unis sont certainement le pays, hors la Russie, qui a accumulé le plus de déchets militaires et civils sans avoir eu la préoccupation dès le début de ce qu'il fallait en faire.

Du côté civil le développement des surgénérateurs s'est avéré un échec. La production de plutonium n'étant plus nécessaire, le retraitement des combustibles irradiés envisagé dans ce but a été rapidement abandonné. Cela simplifie considérablement la gestion des déchets de haute activité puisque le déchet ultime est constitué par le combustible irradié qui garde ensemble l'uranium, le plutonium, les produits de fission et les actinides mineurs.

La solution choisie est donc, après le séjour en piscine du réacteur, l'entreposage en sec dans des conteneurs sécurisés sur site et, enfin, la recherche d'un ou plusieurs sites d'entreposage à sec centralisé (par région). En somme, une solution satisfaisante sur une durée qui peut atteindre le siècle.

Pour le plus long terme, l'idée du stockage géologique profond reste la ligne politique officielle. Là, les difficultés s'accumulent avec l'abandon du site de Yucca Mountain pour des problèmes géologiques et l'opposition à la fois de l'État du Nevada (Las Vegas), de sa population et des

populations locales et surtout de l'accident en 2014 du stockage en profondeur de déchets du centre de recherche militaire de Los Alamos : WIPP, au Nouveau-Mexique.

Le pays père du nucléaire civil se trouve comme beaucoup d'autres à la recherche d'un site apparemment sans beaucoup d'illusions… Tandis que pas mal de centres de recherche travaillent sur des solutions alternatives. La question est plus simple pour le pays concerné lorsque le choix militaire est exclu et que d'autre part, le plutonium à un usage civil n'est pas considéré comme présentant le moindre intérêt. Alors le combustible irradié est le déchet ultime. Ainsi la phase d'entreposage en piscine, suivi ou non d'entreposage à sec sur site ou tout centralisé, ce qui est le cas pour la Finlande et la Suède, précède dans de bonnes conditions de sûreté (surtout si entreposage à sec), l'éventuel stockage définitif.
Très tôt la Suède travaille sur le stockage géologique profonde de granite. Ses chercheurs et son industrie développent un système de conteneur en cuivre devant durer une centaine de milliers d'années. Les critiques sur le choix du granite et du cuivre pour les conteneurs sont nombreuses mais également sur le choix du site de Forsmark en bord de mer vulnérable à la montée des eaux.

Le processus de prise de décision paraît complexe mais s'avère judicieux : prendre le temps de la décision car celle-ci doit être démocratique. Si le principe de stockage profond est un site sont approuvés la Suède n'est en fait qu'au tout début du projet de stockage définitif.

La Finlande qui vise également le stockage profond adopte le projet suédois : choix du granite, choix de la même configuration de l'installation de stockage, en surface comme au fond, choix des conteneurs en cuivre fournis par l'industrie suédoise. Par contre, le pays est très « pro-nucléaire » et accorde une grande confiance aux dirigeants politiques, aux scientifiques et aux ingénieurs et le processus de décision est beaucoup plus rapide qu'en Suède. Très rapidement, le choix du site d'Onkalo proche de la principale centrale nucléaire est adopté alors qu'il se situe sur une petite île et donc vulnérable à la montée des eaux. De ce fait, le projet d'Onkalo est le premier à être mis en œuvre avec le début de la construction du site de stockage.

Du point de vue de la nature des déchets de haute activité, la Belgique et la Suisse se trouvent dans une situation intermédiaire : ces deux pays ont choisi au début de leur programme nucléaire d'envoyer leurs combustibles irradiés pour être retraités en Angleterre et en France qui leur ont renvoyé les produits de haute activité : le plutonium en combustible MOX et les produits de fission et les actinides mineurs sous a forme de déchets vitrifiés. Cela complique évidemment la solution du stockage en profondeur qui est exploré dans ces deux pays avec des objectifs à long terme, la recherche d'un site de stockage étant particulièrement difficile.

Les situations de quatre pays, le Royaume-Uni, la Chine, l'Allemagne et le Japon, ont été traités de façon plus succincte, non pas du fait de l'importance de leur politique nucléaire mais parce que, bien que visant dans un avenir non déterminé une solution de stockage en profondeur, ils se heurtent pour différentes raisons à des difficultés qui rendent assez lointain l'horizon d'un projet bien identifié.

Le cas le plus inquiétant est celui du Royaume-Uni qui, poursuivant à la fois des programmes militaires et des programmes civils, a accumulé sur le site de Sellafield des quantités considérables de déchets de toutes natures, y compris des combustibles irradiés et des déchets vitrifiés, entreposés dans des conditions déplorables sans que, à l'heure actuelle, aucune initiative ne soit prise pour améliore cette situation.

On a pu constater à quel point, sauf peut-être en Finlande, les processus de gestion par un stockage profond s'inscrivent dans une très longue durée. Pour la plupart des pays cette durée n'est même pas prévisible. Pour les plus avancés, il s'agit de projets qui, de la décision à l'exploitation s'inscriront largement au-delà de la fin du XXIème siècle.

Ces projets avancés ont été élaborés au début de notre siècle et il est frappant de constater qu'aucun d'eux ne s'est projeté, non pas seulement sur la centaine de milliers d'années « garantis » par leurs promoteurs mais aussi sur ce que représente la construction et l'exploitation des sites choisis ou envisagés sur la centaine d'années à venir qui va connaître les effets des bouleversements climatiques dont les toutes récentes années nous permettent d'imaginer les conséquences.

Il est clair aujourd'hui que, au-delà des critiques que l'on peut apporter aux projets en cours ou en perspective, tout projet d'installations d'une telle ampleur et d'une telle dangerosité intrinsèque puisqu'il s'agit de manipuler sur un temps aussi long des matières extrêmement dangereuses, doit être entièrement « revisité » à l'aune des bouleversements climatiques, qu'il s'agisse de l'augmentation des températures, des sécheresses, des tornades, de la raréfaction de l'eau, des inondations et de la montée des eaux des océans et des mers, particulièrement pour les sites en bord de mer comme ceux prévus en Finlande et en Suède.

Comme le dit fort justement le géologue suisse Marcos Buser dans un documentaire d'Arte[83] :

« Il n'y a jusqu'ici aucun projet qui ait fonctionné ».

« Je pense que les gens seraient bien plus tranquilles si les experts leur disaient la vérité : « je ne sais pas tout ».

« Il faut mettre les déchets en sub-surface, à 30, 50 ou 100 mètres de profondeur ou à l'intérieur d'une montagne, dans des grottes sécurisées, bien ventilées où on peut les récupérer, et les laisser 200 à 300 ans pour donner le temps de trouver des techniques plus performantes pour traiter ces déchets. »

[83] https://www.youtube.com/watch?v=6EBm2vWxe4o