LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DES DÉCHETS NUCLÉAIRES DE HAUTE ET MOYENNE ACTIVITÉ DE LONGUE DURÉE : LE PROJET CIGÉO

1. LIMINAIRE

Avec la prise de conscience sociétale du changement climatique « programmé » dans les rapports du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et les décisions politiques prises lors des grandes conférences internationales annuelles des Nations Unies (la dernière ; la COP26 Conférence de Glasgow fin 2021) le nucléaire présente 3 caractéristiques favorables : il n'émet pratiquement pas de CO2 ; il est à l'échelle des grands problèmes énergétiques ; son prix de revient est compétitif.

Mais comme toute activité humaine, l'industrie nucléaire produit des déchets : les déchets radioactifs[1]. L'objectif est d'isoler ces déchets vis à vis de l'homme et l'environnement sur une durée suffisante pour perdre leur dangerosité « invisible ».

Dès la fin des années 1950, à cause des risques qu'ils peuvent présenter pour l'homme et l'environnement, la question de la gestion des déchets radioactifs a commencé à être abordée. Dans un premier temps l'effort a porté sur le conditionnement et le traitement des déchets. Puis la question de leur devenir à long terme s'est posée, les chercheurs et les ingénieurs ont commencé à élaborer différentes stratégies pour leur entreposage et leur élimination.

Comme la grande majorité des pays qui possèdent un programme électronucléaire, pour les déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue, la France après de longues études et un processus de choix démocratique s'est orientée vers un stockage géologique des déchets dans les profondeurs du sous-sol.

Dans cette fiche on développera successivement :
- La classification des déchets radioactifs
- La gestion des déchets nucléaires de haute et moyenne activité à vie longue
- La sûreté du projet CIGÉO
- La réversibilité du projet CIGÉO
- Le développement du projet

2. LA CLASSIFICATION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

La classification des déchets radioactifs dans chaque pays dépend des réglementations existantes et de l'historique de la production de ces déchets. En France le classement se fonde sur le contenu radioactif (le niveau de radioactivité, la période radioactive) des déchets pour distinguer plusieurs classes, avec une solution industrielle d'élimination pour chaque classe[2].

Le stockage géologique en profondeur concerne les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL).

- Les déchets HA, avec une activité de plusieurs milliards de becquerels[3] par gramme correspondent principalement aux résidus hautement radioactifs séparés du combustible usé lors des opérations de retraitement. Ces déchets sont vitrifiés, c'est à dire qu'ils sont fixés, dans une matrice de verre particulièrement stable et résistante, sur des durées extrêmement longues à notre échelle.

---

[1] *CEA de la recherche à l'industrie n°14 : Les déchets radioactifs.*

[2] *Fiche argumentaire GAENA n°3 : Les déchets radioactifs.*

[3] *1 Bq = 1 désintégration par seconde.*

- Les déchets MA-VL, moins actifs, mais avec des quantités significatives de radionucléides dont la décroissance radioactive t1/2 peut s'étendre sur plusieurs centaines, voire plusieurs milliers ou millions d'années[4]. Ces déchets correspondent principalement aux structures métalliques entourant le combustible et aux composants activés lors de leur exposition au flux de neutrons des réacteurs.

Les déchets de HA et MA-VL représentent 3 % des déchets nucléaires produits sur notre territoire soit en volume 75000m3 de déchets de moyenne activité à vie longue et 10.000 m^3 de déchets de haute activité. Dans beaucoup de pays le combustible n'est pas « recyclé », c'est l'élément combustible complet qui est considéré comme un déchet de haute activité.

3. GESTION DES DÉCHETS NUCLÉAIRES DE HAUTE ET MOYENNE ACTIVITÉ À VIE LONGUE : HISTORIQUE DE LA SOLUTION FRANCAISE[5]

Le problème des déchets ne pouvant se résoudre de lui-même et ne pouvant qu'empirer au cours des années il fallait, pour que la filière nucléaire se poursuive durablement trouver une solution pour les pour les déchets radioactifs de haute activité et moyenne activité à vie longue.

À partir des années 1970 la grande majorité des pays qui possèdent un programme électronucléaire se sont très rapidement orientés vers le stockage géologique qui consiste à placer les déchets dans les profondeurs du sous-sol pour une durée illimitée et sans intention de les récupérer. En France, comme dans de nombreux pays, lors du déploiement sur le terrain d'une activité de construction il est vite apparu que les dimensions sociétales, jusque-là peu traitées devaient être considérées ; le choix du site, parmi plusieurs options étudiées, ne fut pas « un long fleuve tranquille ».

En 1979 création au sein du commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) de l'agence nationale de gestion des déchets radioactifs (ANDRA). Entre 1987 et 1989, l'ANDRA[6] conduit des études géologiques préliminaires pour trouver le lieu approprié d'implantation d'un laboratoire souterrain de recherches. Quatre sites sont sélectionnés sur la base d'un inventaire réalisé par le bureau de recherches géologiques et minières (BRGM).

Mais ces recherches soulèvent un fort mouvement d'opposition parmi les populations locales conduisant à un blocage social et politique. Le gouvernement décide de suspendre toutes les activités sur le thème « stockage en profondeur » et crée une commission afin de trouver une solution consensuelle. Le parlement légifère et publie la loi no 91-1381 du 30 décembre 1991 (dite loi Bataille) définissant en trois axes le déroulement de la recherche relative à la gestion des déchets nucléaires HA et MA-VL :

- voie 1 : séparation et transmutation des éléments à vie longue dans les déchets. Cette recherche est confiée au CEA.
- voie 2 : le stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes. L'étude est confiée à l'ANDRA qui, avec cette loi, acquiert son indépendance par rapport au CEA et le statut d'établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC). L'ANDRA installe son siège social à Châtenay-Malabry (Hauts de Seine).
- voie 3 : procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface. L'étude est confiée au CEA.

En 1999, l'ANDRA est chargée par l'Etat de créer un laboratoire souterrain pour l'étude du stockage des déchets radioactifs dans le sous-sol argileux de la commune de Bure (Meuse/Haute-Marne), et à l'exploiter jusqu'en 2006. Le projet consiste à tester le stockage en profondeur (500 mètres de profondeur) des déchets HA et MA-VL, une solution visant à les rendre inoffensifs d'ici 100.000 ans. La construction de ce laboratoire souterrain, malgré une grande largesse financière accordée par l'ANDRA aux communes en échange de l'utilisation du sous-sol, provoque une forte opposition chez de nombreux riverains concernés.

En 2005, après quinze années de recherches, comme le prescrit la loi Bataille, les trois programmes rendent leur rapport :

- la faisabilité technologique de la séparation et de la transmutation n'est pas acquise à ce jour et de plus l'élimination des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue ne sera pas totale.

---

[4] *La demi-vie t1/2 correspond au temps au bout duquel l'activité a été divisée par deux.*

[5] *Plusieurs articles de Catherine Veyer - Association des Retraités et Anciens de SGN-Euriware-Orano Projets – 2020, 2021*

[6] *ANDRA ; Article Wikipedia.*

- l'entreposage de longue durée ne peut pas constituer une solution définitive pour la gestion des déchets radioactifs de haute activité à vie longue.
- pour le stockage en formation géologique profonde le dossier remis par l'ANDRA a été instruit par l'institut de radioprotection et de sureté nucléaire (IRSN). A l'issue de son examen par les experts l'autorité de sureté nucléaire (ASN) considère que le stockage en formation géologique profonde est une solution de gestion définitive qui apparait incontournable.

Un débat public national se tient en 2005/2006. Les parlementaires par la loi du 28 juin 2006 entérinent le choix du stockage géologique profond et imposent une exigence de réversibilité d'au moins 100 ans. La loi demande la mise en place d'un plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) révisé tous les 3 ans et fixe un calendrier pour les 20 années suivantes.

Après un long processus démocratique la loi du 28 juin 2006 marque la naissance du projet CIGÉO : réalisation d'un centre industriel de stockage géologique des déchets nucléaires français de haute et moyenne activité à vie longue(CIGÉO) sur le site de Bure (Meuse/Haute-Marne).

Un deuxième débat public a lieu en 2013 suivi d'une troisième loi le 25 juillet 2016 qui prévoit une phase industrielle pilote permettant d'assurer le caractère réversible et la démonstration sûreté de l'installation. Cette étape aboutit à un nouveau planning : après le dépôt de la demande d'autorisation de création par l'ANDRA un décret, début 2025, marquera le début de la phase industrielle pilote ; décision de mise en service par l'ASN en 2035.

Durant le développement du projet l'ANDRA poursuit un dialogue avec la société civile et met à disposition un espace dédié à la concertation d'information et de participation du citoyen ; un lobbying, moins agressif plus éthique, permettant au public de participer à l'élaboration des variantes du projet.

4. LA SÛRETÉ DU PROJET CIGÉO

Le but du stockage géologique est d'isoler les déchets radioactifs de l'environnement humain et de l'atmosphère sur des durées pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers d'années voire des millions d'années.

Afin de respecter cet objectif le projet de stockage est conçu pour être sûr depuis la phase d'exploitation du site jusqu'à et même au-delà de sa fermeture. Le challenge est « titanesque » : les chercheurs, les ingénieurs, les techniciens et les industriels se trouvent confrontés à un défi incertitude essentiel : évaluer un risque et assurer la sûreté sur une échelle de temps (100.000 ans) qui donne le vertige.

Le corollaire, est-il possible : de prévoir le comportement du site sur cette durée ; d'assurer la transmission des savoir nécessaires à la maintenance ; de maîtriser les bouleversements politiques suivis de conflits, etc. Ces incertitudes dépassent le domaine de la science pure pour toucher aux aspects sociétaux, éthiques, politiques.

La sûreté nucléaire du stockage va reposer sur un ensemble de barrières successives limitant la circulation d'eau, tout d'abord vers les « colis » en béton pour les déchets MA-VL et en acier inoxydable pour les déchets HA puis, une fois que le déchet « dépose » ses radionucléides dans l'eau, la circulation de ces radionucléides vers la surface :

- les premières barrières (dites ouvragées) sont fabriquées par l'homme. Il s'agit par exemple de la matrice vitreuse dans laquelle les radioéléments sont figés.
- la barrière ultime est la barrière géologique, c'est la roche au sein de laquelle le site est construit. La barrière géologique joue un rôle primordial en retardant (voire en l'annihilant), sur l'échelle de temps considéré, la migration des radionucléides vers la surface par des mécanismes physico-chimiques (barrière à la diffusion, sorption, …)[7].

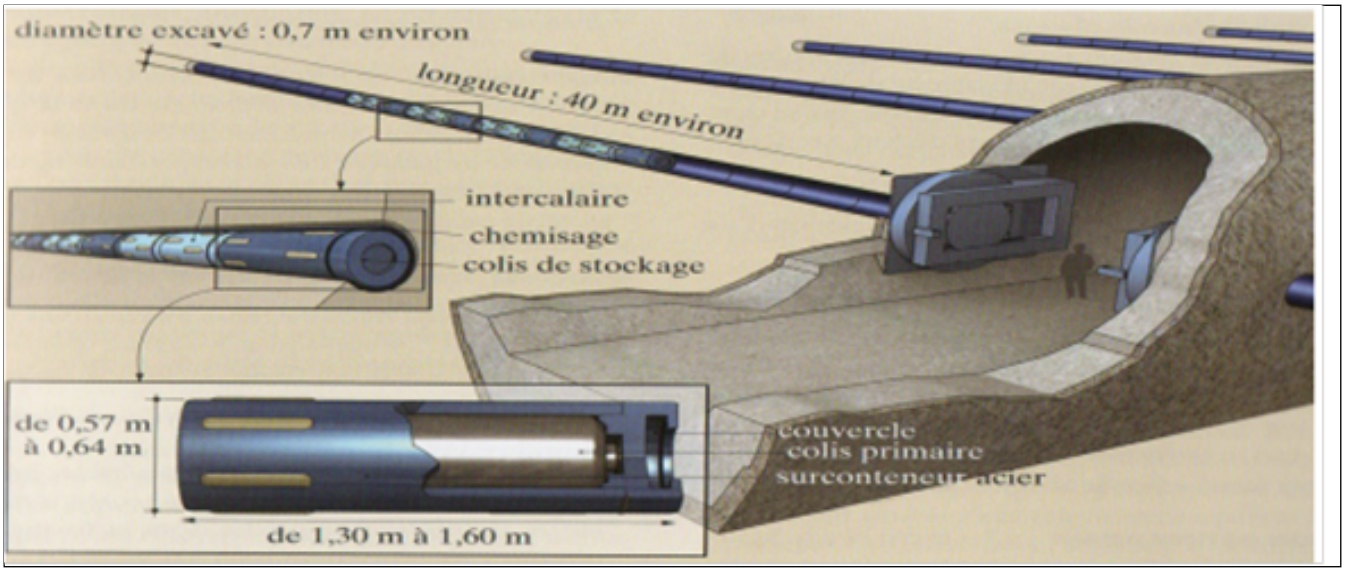
L'ampleur du projet, avec un impact fort sur les générations futures, a initié de nombreuses études pour conforter le choix de l'ultime barrière et le valider. Disposant, depuis les années 2000 d'un laboratoire souterrain propre au projet CIGÉO, l'ANDRA a pu mener ses propres validations expérimentales.

Ce laboratoire est un outil de recherche unique en France, complémentaire de celui de Tournemire (Aveyron) construit et exploité par l'IRSN. Il se compose : d'installations de surface (bâtiments administratifs, bâtiments de recherches) ; de deux puits d'accès de 4 et 5 mètres de diamètre ; de 2000 mètres de galeries souterraines). Il permet de mener des travaux scientifiques et technologiques directement au sein de la couche d'argile, stable depuis 160 millions d'années, sélectionnée pour l'implantation de CIGÉO.

[7] *À noter que la lenteur de déplacement des radionucléides transuraniens de longue durée de vie a été prouvée, tant sur le site de Tchernobyl que sur le site de la réaction nucléaire naturelle qui a eu lieu sur le site d'Oklo au Gabon il y a quelques deux milliards d'années.*

4.1. Le stockage doit être sûr pendant la phase d'exploitation du site

Il s'appuie sur les études ayant validé le choix de la roche au sein de laquelle le centre industriel sera construit. La sûreté repose aussi sur l'architecture générale du stockage (la figure ci-dessous visualise un ensemble de tunnels horizontaux appelés alvéoles comprenant des zones pour les déchets HA séparées des zones pour les déchets MA-VL ; les matériaux très résistants à la corrosion utilisés pour les colis ; les matériaux de comblement et de scellement ; les contrôles très exigeants ; le suivi de l'évolution du stockage …



Le confinement de la radioactivité est conditionné par la maîtrise des risques : liées aux activités de chantier et aux activités nucléaires en séparant strictement ces deux activités ; d'incendie en limitant la présence des objets inflammables ; de chute des colis de déchets ; d'explosion due à l'hydrogène émis par les colis radioactifs en limitant le dégazage des colis et en ventilant les alvéoles de stockage suffisamment espacées pour limiter l'augmentation de température ; de panne d'électricité par des équipements de secours électriques et des groupes électrogènes comme pour des centrales nucléaires ; de déclenchement intempestif d'une réaction neutronique en chaîne (risque de criticité) par la géométrie des colis et la disposition dans le stockage, …

Au niveau de l'impact sur la radioactivité ambiante, à proximité du site durant son exploitation, les modélisations numériques prévoient une dose de 0,01 mSv/an très faible, inférieure d'un facteur 100 au 1 mSv/an imposé par la législation, valeur à ne pas dépasser.

4.2. Le stockage doit être sûr après la fermeture du site

La garantie de sûreté du stockage est assurée par la prise en compte dans le projet CIGÉO des phénomènes et aléas qui pourraient dégrader et remettre en cause cette sûreté : le site résisterait au séisme le plus fort géologiquement possible dans la couche d'argile de grande épaisseur (plus de 100 m) située à grande profondeur (environ – 500 m), ce qui la protège également de l'érosion ou des glaciations qui n'affectent qu'une épaisseur de 200 m maximum sur de longues durées.

La roche argileuse présente par ailleurs une très bonne résistance à la diffusion des éléments radioactifs contenus dans les déchets afin de limiter et de ralentir le déplacement de ces éléments jusqu'à la surface. Au total, seules des traces de chlore-36 (t1/2 = 0,3 millions d'années) et l'iode-129 (t1/2 = 15 millions d'années), très peu radiotoxiques, pourront se retrouver dans les nappes phréatiques.

5. LA REVERSIBILITÉ DU PROJET CIGÉO

La troisième loi du 25 juillet 2016 (chapitre 3) est importante, elle précise le calendrier et les modalités de création par l'ANDRA d'une installation de stockage réversible : parce que l'on ne peut prédire les progrès techniques du siècle à venir ni préempter les décisions de nos descendants, le stockage en profondeur est conçu pour être réversible[8].

[8] *ANDRA: la réversibilité du projet pour garantir des choix* ***www.asn.fr*** *; CIGEO projet de centre de stockage profond des déchets https://www.cigeo.gouv.fr/ : comment - est-il financé ?*

L'ASN précise que le principe de réversibilité compte deux composantes absolues : l'adaptabilité (garantie d'évolution lors de la construction, puis du fonctionnement du stockage) et la récupérabilité (garantie d'avoir la possibilité, pendant une période donnée, de récupérer des déchets déjà stockés).

La réversibilité garantira donc la possibilité soit de poursuivre la construction des tranches successives telles que conçues initialement soit de réévaluer les choix définis permettant d'intégrer les progrès techniques et de s'adapter aux besoins. Pour assurer cette réversibilité les actions suivantes sont mises en œuvre :la poursuite de la recherche et l'acquisition des connaissances pour les générations suivantes ; la mémorisation et la transmission des données sur le stockage ; la possibilité de modifier les plannings et le stockage des colis ;la récupérabilité des colis ; la construction progressive des installations souterraines.

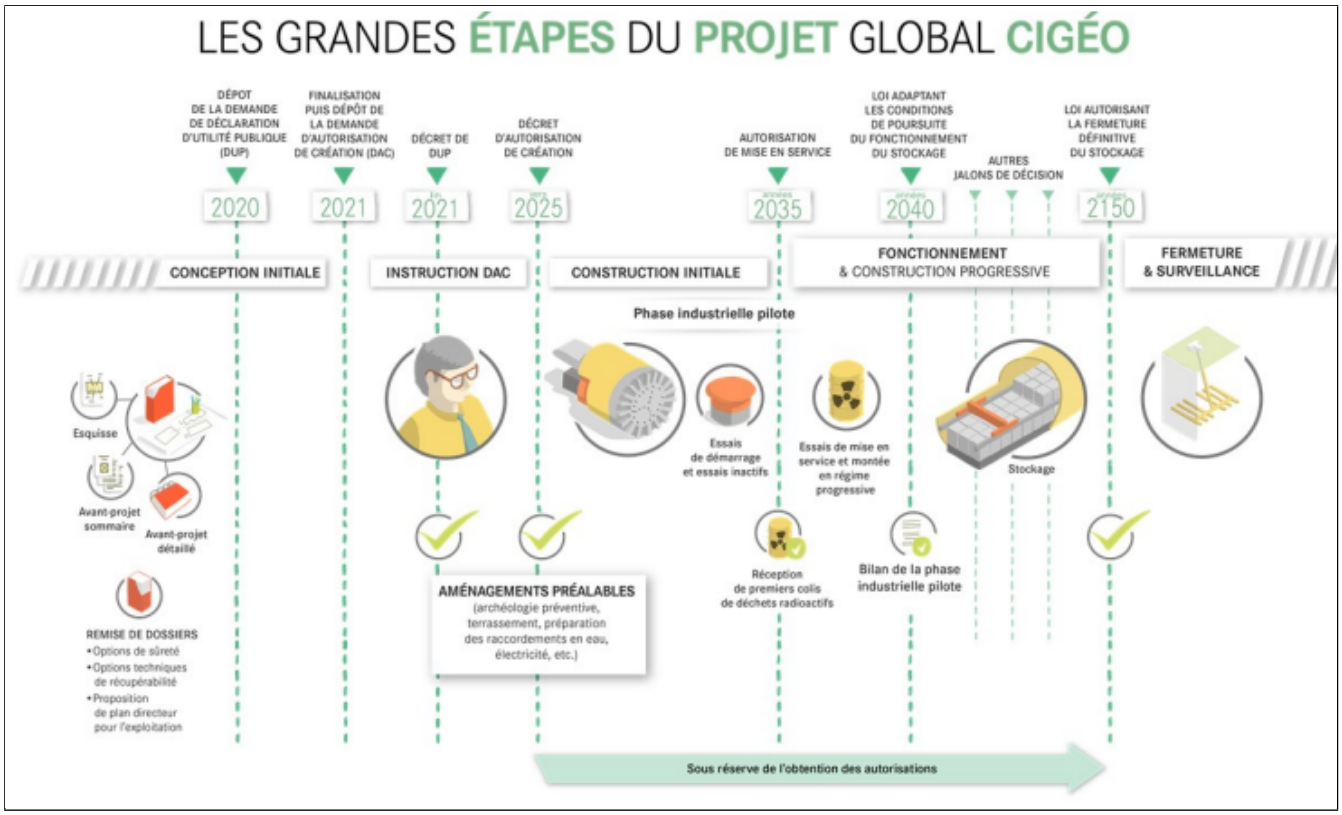
6. LE DÉVELOPPEMENT DU PROJET CIGÉO

L'Etat, par des contrôles réguliers et des évaluations qui seront une base de prise de décisions pour les générations futures, jouera son rôle de garant de la sûreté de l'exploitation.

Le coût objectif du projet est de 25 milliards d'euros[9], coût arrêté en 2016 sur la base d'une évaluation de l'ANDRA, avec les avis de l'ASN et des exploitants nucléaires. Cette valeur représente pour un quart les travaux d'aménagement et de construction, les trois quarts restant servant au financement durant la période d'exploitation sur plus de 100 ans jusqu'à la fermeture ainsi que les impôts et les taxes. Mais il est clair que le coût de base objectif de CIGÉO fera l'objet de plusieurs réévaluations progressives.

Le 3 août 2020 l'ANDRA a déposé la demande de déclaration d'utilité publique. L'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique s'est déroulée du 15 septembre au 23 octobre 2021 : l'avis a été favorable sans réserve. En 2025, la prochaine étape importante sera la demande d'autorisation de création (DAC), un décret favorable marquera le début de la phase industrielle pilote avec en 2035 une autorisation possible de mise en service du centre industriel (CIGÉO). L'installation souterraine se développera au fur et à mesure de son exploitation, les colis arriveront progressivement et essentiellement par voie ferroviaire. Au terme d'une centaine d'années l'exploitation s'étendra sur une emprise souterraine d'environ 15 km^2. L'exploitation du site associera 600 emplois durables, sa construction beaucoup plus.

Cette étape positive aboutit au nouveau planning prévisionnel ci-dessous. Depuis sa publication ce planning s'adapte, avec des modifications qui n'affectent pas la réalisation du projet:



[9] https://www.cigeo.gouv.fr/: *comment le projet est-il financé ?*

7. CONCLUSION

Le stockage des déchets nucléaires à haute et moyenne activité à vie longue est considéré par l'ASN comme une gestion incontournable et conforme à la directive européenne, 2011/70/Euratom du 19 juillet 2011, relative à la gestion sûre et responsable des déchets radioactifs qui rappelle que le stockage en couche géologique profonde constitue actuellement la solution la plus sure et la plus durable en tant qu'étape finale de la gestion des déchets nucléaires de haute activité.

En France CIGÉO doit permettre de confiner environ 85.000 m^3 de déchets radioactifs à haute activité et à vie longue pour plusieurs centaines de milliers d'années. Après un siècle d'exploitation la fermeture devrait se faire en plusieurs étapes. Une fois le site scellé la sûreté du stockage sera assurée, sans intervention humaine, grâce à la conception et au choix du milieu géologique. Le concept de réversibilité permettra aux générations futures de faire évoluer le centre industriel de stockage avec les évolutions techniques en association à la société civile. Après fermeture une surveillance sera maintenue aussi longtemps que la société le jugera nécessaire, l'objectif étant la conservation et la transmission de la mémoire du site et des enjeux de sûreté aux générations futures.

Comme tous les pays possédant un programme électronucléaire la France a fait le choix d'un centre industriel de stockage géologique des déchets radioactifs de HA et MA-VL. Pour résumer il existe « en gros » trois concepts pour le lieu d'implantation de ce centre industriel : milieu géologique en roche dure (comme le granite) choix de la Finlande, de la Suède, de la Russie, de la Chine ; milieu géologique en roche tendre (comme l'argile) choix de la Belgique, la Hollande ; milieu géologique en roche saline (comme l'halite) choix en partie des USA, de la Hollande.

Une fois la solution technique définie le choix du site a été une étape cruciale. Les dimensions sociétales n'ayant pas été anticipées, de nombreux projets ont été stoppés et ont dû être repensés globalement: c'est le cas des USA, du Japon (très grande opposition du public), du Royaume Uni, de l'Allemagne. Le « long parcours tranquille » de la France ne fait donc pas exception à la règle.

La Finlande est le pays le plus proche de la mise en service d'un site de stockage géologique sur le territoire européen. La construction puis la mise en exploitation est prévue pour 2023. Le seul centre de stockage actuellement en activité est celui de WIPP à Carlsbad au Nouveau Mexique (USA) pour les déchets plutonigènes d'origine militaire à 650 m de profondeur dans une couche de sel de 1000 m d'épaisseur.

Publication - Copyright© : libre, sous réserve de mentionner l'origine ARCEA/GAENA