



Catherine Veyer

Novembre 2020

Considérations sur le stockage géologique des déchets nucléaires de haute activité – Partie 1 – Les enjeux et les choix

La question de la gestion des déchets radioactifs a commencé à être abordée à la fin des années 1950 lors de grandes conférences internationales, notamment celles organisées dans le cadre des Nations-Unies sur les applications pacifiques de l'énergie nucléaire. Dans un premier temps, l'attention s'est focalisée essentiellement sur le conditionnement et le traitement des déchets. Ce n'est que progressivement que la question de leur devenir à long terme s'est posée et que les chercheurs et les ingénieurs ont commencé à élaborer différentes stratégies pour leur entreposage et leur élimination.

En fonction de leur origine (mines d'uranium ou d'autres minéraux, production de combustible nucléaire, production de matières fissiles, production et utilisation d'isotopes médicaux radioactifs, production et utilisation de sources radioactives pour l'industrie, exploitation des usines, exploitation des réacteurs, retraitement/recyclage du combustible, recherche, démantèlement...), de la nature (isotopie et période de décroissance) et de la concentration des radioéléments qu'ils contiennent, les différents pays mettent en place des méthodes de gestion adaptées. En France, les premières études ont débuté dès les années 60. L'ANDRA (Agence Nationale de gestion des Déchets Radioactifs) a été créée en 1979 au sein du CEA pour concevoir les solutions de stockage adaptées à chaque déchet et assurer la gestion de l'ensemble des déchets radioactifs produits en France. En 1991, le parlement en fait une agence publique indépendante placée sous la tutelle des ministères chargés de la Recherche, de l'Industrie et de l'Environnement.

Les plumes de l'ARA proposent une série d'articles sur le sujet, en se focalisant plus particulièrement sur les déchets de haute et moyenne activité à vie longue. La présente première partie introduit la notion de classification des déchets, présente les enjeux essentiels qui sous-tendent la gestion des déchets de haute activité et les raisonnements qui ont conduit à un consensus international en faveur d'une solution d'élimination par mise en stockage géologique. Une deuxième partie à paraître fera le point sur le programme français. Une troisième partie présentera quelques programmes étrangers.

1. La classification des déchets radioactifs

La classification des déchets radioactifs dans chaque pays dépend des contextes industriels et réglementaires spécifiques, et de l'historique de production de ces déchets. Aux USA par exemple, la classification des déchets est fondée sur leur origine : militaire, électronucléaire, déchets miniers, ... En France on se fonde sur le contenu radioactif (niveau de radioactivité, période radioactive) des déchets pour distinguer plusieurs classes, avec une solution industrielle d'élimination pour chaque classe¹. L'objectif dans chaque cas est d'isoler les déchets vis-à-vis de l'homme et de l'environnement sur une durée suffisante pour que le caractère dangereux de ces déchets retombe à des valeurs similaires à la radioactivité naturelle.

La classification française et les solutions de gestion retenues pour chaque classe de déchets sont résumées dans le tableau ci-dessous. A noter que, à l'exception des déchets à vie très courte, la législation française n'autorise pas la libre remise en circulation des déchets issus des zones où l'on manipule des

¹ On trouvera plus de détails sur le site de l'ANDRA <https://www.andra.fr/les-dechets-radioactifs>.

matières nucléaires, même si leurs caractéristiques radioactives sont semblables à celles des déchets classiques. Dans d'autres pays (Suède, Allemagne, USA, Belgique, Royaume Uni...) il existe des « seuils de libération » en dessous des quels les déchets peuvent être recyclés librement ou avec restrictions dans les circuits classiques.

Catégorie	Déchets dits à vie très courte	Déchets dits à vie courte	Déchets dits à vie longue
Très faible activité (TFA)	 Gestion par décroissance radioactive	 Stockage de surface (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage)	 Stockage à faible profondeur à l'étude
Faible activité (FA)		 Stockage de surface (Centres de stockage de l'Aube et de la Manche)	
Moyenne activité (MA)	Non applicable		 Stockage profond en projet
Haute activité (HA)			

2

Les déchets à vie très courte (VTC). Certains déchets proviennent majoritairement du secteur médical ou de la recherche et contiennent des radionucléides à vie très courte (dont la période radioactive est inférieure à 100 jours) utilisés à des fins diagnostiques ou thérapeutiques. Ils sont gérés par décroissance: ces déchets sont entreposés sur place, de quelques jours à quelques mois, temps pour que leur radioactivité diminue suffisamment afin d'être évacués dans des filières conventionnelles.



Les déchets de très faible activité (TFA), avec une activité inférieure à 100 becquerels par gramme³, proviennent essentiellement de l'exploitation et du démantèlement des installations nucléaires, mais aussi de l'assainissement et de la réhabilitation d'anciens sites pollués. Ce sont des déchets inertes (gravats, terres, bétons) ou métalliques qui représentent environ 30 % du volume total de déchets radioactifs produits en France, mais seulement 0,0001 % de la radioactivité totale contenue dans ces déchets. Ils sont stockés en surface au CIRE (Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage) ouvert en 2003. Après un éventuel prétraitement (compactage pour les solides, solidification pour les liquides) les déchets conditionnés en fûts ou en big-bags sont empilés dans des alvéoles de stockage ménagées dans une couche argileuse à quelques mètres de profondeur. Lorsque l'alvéole est remplie, elle est recouverte d'une couverture composée notamment de sable, d'une

membrane imperméable et d'argile.⁴

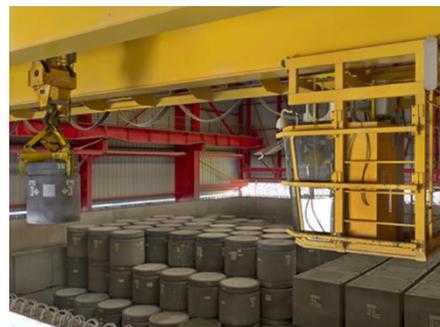
Les déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC) proviennent essentiellement de la maintenance et du fonctionnement des installations nucléaires (vêtements, outils, filtres...), ainsi que des activités de recherche ou de soins. Les déchets FA présentent des activités comprises entre quelques centaines et un million de becquerels par gramme. Les déchets MA présentent des activités de l'ordre de 1 million à 1 milliard de becquerels par gramme. La radioactivité des déchets FMA-VC provient essentiellement de radionucléides de période radioactive inférieure ou égale à 31 ans ce qui permet un retour au niveau naturel de radioactivité au bout de 300 ans. Ils représentent environ 60% du volume total

² Source <https://inventaire.andra.fr/les-matieres-et-dechets-radioactifs/classification-des-dechets-radioactifs-et-filieres-de-gestion>

³ Pour mémoire, le **becquerel (Bq)**, unité légale de mesure internationale utilisée en radioactivité, est égal à une désintégration par seconde. (1 **curie** = 37 milliards de **Bq** et réciproquement 1 **Bq** = 27×10^{-12} **Ci** = 27 **pCi**).

⁴ Source de l'image <https://inventaire.andra.fr/les-matieres-et-dechets-radioactifs/classification-des-dechets-radioactifs-et-filieres-de-gestion>

de déchets et 0,03% de la radioactivité totale contenue dans les déchets. Ces déchets sont stockés au Centre de Stockage de l'Aube (CSA) depuis 1992. Un premier centre de stockage, le CSM (Centre de Stockage de la Manche) a été exploité de 1969 à 1994, et est maintenant en phase de surveillance post-fermeture. Les déchets sont compactés ou solidifiés, puis placés dans un conteneur en béton ou en acier. Les colis (contenant entre 15 à 20% de déchets et 80 à 85 % de béton) sont placés dans des alvéoles en béton armé. Une fois remplis, ces ouvrages sont fermés par une dalle de béton avec une étanchéité assurée par une couche de résine imperméable. Par-dessus, la couverture définitive sera assurée par une couche d'argile de plusieurs mètres d'épaisseur, avec une membrane imperméable pour assurer une protection à long terme.⁵



Les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL). Ce sont des déchets de faible activité, mais ils contiennent des quantités significatives de radionucléides de période supérieure à 31 ans. Ces caractéristiques ne permettent pas de les stocker dans des centres de surface tels que le CSA, en raison de leur période de décroissance plus longue. On distingue principalement les déchets radifères (contenant du radium) issus de l'exploitation de minerais (tels que les terres rares ou l'uranium) ou de l'assainissement de sites anciens ayant utilisé du radium ou du thorium, et les déchets de graphite issus de l'exploitation et du démantèlement des réacteurs nucléaires de première génération (UNGG). Entrent aussi dans cette catégorie des déchets divers tels que têtes de paratonnerres radioactives, peintures luminescentes anciennes, détecteurs d'incendie, objets anciens. Pour ces déchets qui représentent un tout petit volume (moins de 6% du volume total de déchets, et une petite activité (0,14%) les scénarios sont en cours d'étude à l'ANDRA.



Les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) proviennent principalement du secteur de l'industrie électronucléaire et des activités de recherche associées ainsi que des activités liées à la Défense Nationale.

En France, les déchets HA, avec une activité de plusieurs milliards de becquerels par gramme, correspondent principalement aux résidus hautement radioactifs séparés du combustible usé au cours des opérations de recyclage. Ils représentent seulement 0,2 % du volume total de déchets radioactifs, mais concentrent près de 95% de la radioactivité totale contenue dans ces déchets. En France, ces déchets HA sont vitrifiés, c'est-à-dire qu'ils sont fixés dans une matrice particulièrement stable et résistante sur des durées extrêmement longues.⁶



Les déchets MA-VL, moins actifs, mais avec des quantités significatives de radionucléides à vie longue, correspondent principalement aux structures métalliques entourant le combustible (gaines tronçonnées sous forme de « coques », embouts des assemblages combustibles...) séparés lors des opérations de recyclage ou aux résidus liés au fonctionnement des installations nucléaires. Les autres types de déchets MA-VL proviennent des composants qui ont été activés lors de leur exposition au flux de neutrons des réacteurs. Les déchets MA-VL représentent environ 6% du volume et 5% de l'activité totale des déchets.⁷



⁵ Source de l'image : <https://inventaire.andra.fr/les-matieres-et-dechets-radioactifs/classification-des-dechets-radioactifs-et-filieres-de-gestion>

⁶ Source : <https://inventaire.andra.fr/les-matieres-et-dechets-radioactifs/classification-des-dechets-radioactifs-et-filieres-de-gestion>

⁷ Source : <https://inventaire.andra.fr/les-matieres-et-dechets-radioactifs/classification-des-dechets-radioactifs-et-filieres-de-gestion>

Dans la suite de l'article, nous nous concentrerons sur cette dernière catégorie HA et MA-VL de déchets ultimes, qui représentent le plus grand danger pour l'homme et l'environnement.

Dans d'autres pays que la France, le combustible n'est pas recyclé, et c'est l'élément combustible complet qui est considéré comme un déchet de haute activité, y compris l'uranium non fissionné qui constitue plus de 90 % de la masse résiduelle du combustible utilisé.

2. Les enjeux d'une élimination efficace des déchets radioactifs de haute activité

Un danger invisible, susceptible de se manifester à des horizons de temps très éloignés. Les combustibles usés, les déchets HA vitrifiés ou les colis de déchets MA-VL sont dangereux pour l'homme sur de très longues périodes. Les techniques de conditionnement et d'entreposage actuelles permettent de les isoler de manière satisfaisante et sûre pour des durées de l'ordre du siècle, c'est-à-dire pour notre génération et la ou les générations suivantes. Mais ces techniques ne sont pas compatibles avec les besoins d'isolement à très long terme pour ces déchets. Et quelle que soit la solution technique envisagée, nous nous trouvons confrontés à une incertitude essentielle : celle d'évaluer un risque et d'assurer la sûreté et la maîtrise du risque sur des échelles de temps dépassant largement la durée d'une civilisation. Par exemple :

- Est-il possible de prévoir de manière déterministe le comportement d'un système physique, ouvrage ou naturel, même complètement passif, sur ces durées ?
- Comment vont évoluer le climat et la géosphère ?
- Comment va évoluer l'espèce humaine, quelles évolutions de civilisations, quels conflits, quels bouleversements politico-économiques ? Quels seront les activités, les besoins de l'homme ?
- Quel sera l'état des techniques et des savoirs à l'avenir ? Les civilisations suivantes auront-elles les compétences et les capacités pour assurer un minimum de maintenance ou, au contraire, le savoir et les moyens auront-ils disparu ?
- Comment assurer la transmission de l'information sur de telles durées, alors que l'histoire de la transmission écrite ne compte que quelques milliers d'années ?
- Comment permettre aux civilisations futures de mettre en œuvre une solution améliorée dans le futur si les progrès techniques le permettent ?
- ...

Ces incertitudes dépassent largement le domaine de la science pure. On touche ici à des aspects sociétaux, éthiques, politiques, philosophiques, voire anthropologiques. Mais l'existence même de ces incertitudes, et le manque d'information accessible sur ces sujets souvent hautement techniques conduit à une grande méfiance de la part du public de tous les pays, qu'il faut convaincre.

Responsabilité vis-à-vis des générations actuelles et à venir. Un consensus international s'est établi pour considérer que notre génération, qui produit ces déchets (et qui a aussi déjà hérité de stocks produits par nos prédécesseurs immédiats), ne doit pas les laisser s'accumuler en transmettant la responsabilité et la charge aux générations futures. D'autre part, nous ne devons pas non plus empêcher les générations futures d'assumer leurs responsabilités si elles souhaitent revenir sur les dispositions décidées par notre génération. Cette prise de responsabilité se heurte à une tendance naturelle à repousser les décisions difficiles à prendre : réticence des politiques à prendre des décisions parfois impopulaires, réticence du public à accepter la notion d'utilité publique, réticence du public à accepter des décisions engageantes prises par d'autres, réticence des industriels qui ne souhaitent pas forcément anticiper des dépenses qui

ne sont pas urgentes, intérêt des opposants à maintenir un climat d'incertitude, intérêt des scientifiques qui voient s'ouvrir des domaines de recherches nouveaux, réticence de l'autorité de sûreté qui multiplie les réglementations de plus en plus restrictives, espoir que la technique et les connaissances vont constamment s'améliorer...

Comme le fait remarquer Christian Bataille ancien député, ancien vice-président de l'Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, et rapporteur de la loi sur la gestion des déchets radioactifs, dans son Rapport sur l'Evolution de la Recherche sur la Gestion des Déchets Nucléaires à Haute Activité en 1996, « *et pourtant il nous faut prendre des décisions, le problème ne pouvant pas se résoudre lui-même et ne faisant même qu'empirer au cours des années. ... Sous peine d'être accusés de négligence dans quelques années, nous devons agir dès aujourd'hui et engager des programmes de travaux coûteux et souvent impopulaires à partir de connaissances fragmentaires et parfois incertaines* ».

Permettre la mise en place d'une industrie nucléaire civile durable. Enfin, pour qu'une filière nucléaire puisse être mise en œuvre et poursuivie durablement dans le futur, il est nécessaire de donner l'assurance que les déchets ne vont pas s'accumuler sans solution. En France, par exemple, des Règles Fondamentales de Sûreté émises dans les années 1990 imposaient que, pour les usines de La Hague les déchets séparés des combustibles soient conditionnés en ligne pour être entreposables de manière sûre. Aux USA, à la suite de la décision d'interrompre le retraitement civil, la Nuclear Waste Policy Act en 1982 impose à l'Etat Fédéral de prendre en charge les combustibles usés civils et de les stocker de manière définitive à partir de 1998. En Suède, la responsabilité de trouver une solution est à la charge des utilités qui ont créé un consortium pour cela.

3. Un consensus international sur la solution de stockage géologique^{8, 9, 10}

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, a été l'option retenue de façon prioritaire au niveau international à partir des années 1960-1970 après avoir un temps considéré l'immersion en mer. Des programmes de recherche importants ont été lancés dans la plupart des pays dotés de programmes nucléaires civils pour développer ce concept sur le plan technique.

Les principaux objectifs du stockage géologique tels que défini par l'AIEA sont, d'une part, d'assumer la responsabilité des générations actuelles envers les générations futures, en isolant les déchets sur de longues durées sans avoir à recourir à l'intervention humaine et sans imposer aux générations futures des contraintes particulières, notamment de surveillance et, d'autre part, de garantir la sûreté radiologique sur le très long terme.

D'autres options d'abandon des déchets ont également été envisagées dans de nombreux pays, toujours dans une optique d'abandon définitif, pour réduire l'accessibilité des déchets pour l'homme.

Par exemple une étude d'impact exhaustive (impact à court terme lors des phases de construction et de mise en place, impact à long terme, risque résiduel, aspects économiques, état de développement des techniques...) est réalisée aux USA au début des années 1980¹¹, comparant un très grand nombre d'options, qui aboutit en 1982¹² au choix du stockage géologique pour les combustibles usés et les déchets

⁸ Source : IRSN report 2019-00318 – *International panorama of research on alternatives to geological disposal of high-level waste and long-lived intermediate-level waste* – Mai 2019

⁹ Source : Centre d'Etude sur l'Evaluation de la Protection dans le domaine nucléaire (CEPN) – Rapport N°268 – *La gestion du risque associé aux déchets radioactifs à haute activité et à vie longue* – J. LOCHARD, C. SCHIEBER, T. SCHNEIDER, P. CROUAIL, J. DEGRANGE, A. LE DARS – Août 2000

¹⁰ Wikipedia

¹¹ DOE/EIS-0046F – *Final Environmental Impact Statement – Management of commercially generated Radioactive waste* – Octobre 1980

¹² *Nuclear Waste Policy Act* - 1982

du retraitement. Les options étudiées dans cette étude d'impact étaient, outre le stockage en formation géologique :

- la mise en place en puits très profonds forés individuellement (la profondeur étant choisie de telle manière que les déchets ne puissent pas remonter à la surface et soient situés en-dessous des zones de circulation des eaux souterraines). Ceci n'est évidemment pas applicable à tous les types de déchets, et de nombreuses incertitudes techniques sont identifiées, l'une des plus importante étant le contrôle du forage et de la mise en place sur des distances de plusieurs km, avec aussi la question du maintien de l'étanchéité
- Mise en cavité et fusion de la roche sous l'effet de la chaleur résiduelle (vitrification in-situ). Ceci ne serait possible que pour les déchets les plus chauds, et les combustibles usés entreposés à l'heure actuelle ne permettraient pas d'atteindre cette densité de puissance thermique. La solution envisagée était éventuellement la mise sous forme d'une solution concentrée injectée directement dans la cavité. Sous l'effet de la chaleur, la solution s'évapore et il ne reste que les Produits de Fission concentrés sous forme de sels, capables alors d'apporter la puissance nécessaire.
- Stockage en formation géologique dans une île déserte, qui est une variante du stockage en formation géologique
- Stockage en formation sédimentaire sous le fond de la mer. Cette hypothèse paraît techniquement faisable, mais se heurte aux accords internationaux interdisant le dépôt de déchets en mer.
- Stockage dans ou sous une banquise continentale, difficilement envisageable avec l'évolution actuelle des banquises. Par ailleurs le traité de l'Antarctique interdit l'utilisation de la banquise Antarctique. L'autre banquise continentale se situe au Groenland, sous la souveraineté du Danemark.
- Injection sous forme liquide à grande profondeur (plusieurs kilomètres) dans des environnements géologiques appropriés (roches poreuses surmontées de roches imperméables) ou dans des zones de marnes avec fracturation hydraulique et injection sous forme de coulis cimentaire.
- Transmutation des actinides avec stockage géologique des produits non transmutés (produits de fission à très longue vie tels que le Technétium-99 ou l'iode-129).
- Envoi vers l'espace, après solidification, par exemple en une matrice composite céramique – métal. Ceci nécessiterait des systèmes à plusieurs niveaux avec des navettes récupérables et des stations intermédiaires de lancement des colis sur une trajectoire échappant à la Terre. La faisabilité technique et économique, ainsi que la sûreté sont difficiles à assurer (exemple : risque d'accident lors du lancement).
- Attente en entreposage sans rien faire.

Pour l'ensemble de ces options, on n'observe pas de nette amélioration de l'impact par rapport au stockage en formation géologique, mais les incertitudes techniques sont souvent élevées, ce qui fait douter de la possibilité de les mettre en œuvre dans un futur proche. L'étude conclut que la solution de référence proposée (stockage en formation géologique) est l'option préférée, assortie ou non d'un

entreposage d'attente. Des solutions alternatives méritant un complément de R&D sont cependant identifiées : puits très profond (pour les déchets de retraitement uniquement) et mise en formation sédimentaire dans des formations sédimentaires stables sous les fonds océaniques. Dans d'autres pays, comme la France par exemple, quelques solutions complémentaires ont fait l'objet ou continuent à faire l'objet d'études plus poussées, comme la transmutation par exemple.

Au niveau international le consensus se fait donc progressivement autour du confinement des déchets et de leur évacuation en formation géologique, avec des options d'entreposage plus ou moins prolongé avant cela pour permettre en particulier d'étudier d'éventuelles solutions alternatives. Mais on observe aussi que dans la plupart des pays, la charge de ces sujets d'intérêt général a été confiée majoritairement aux experts scientifiques et techniques. On explorait uniquement l'aspect technique du problème. Du fait de la très haute technicité du sujet, les experts, y compris les conseils scientifiques des autorités, étaient peu nombreux, et appartenaient souvent aux organismes producteurs de déchets eux-mêmes. En France par exemple, jusqu'en en 1990, l'ANDRA (Agence Nationale de Gestion des Déchets Radioactifs) était un service du CEA.

Dans de nombreux pays, une fois la solution technique définie de manière préliminaire, il a été nécessaire de réfléchir au déploiement d'une solution sur le terrain. Il est vite apparu que des dimensions, en particulier sociales, jusque-là peu traitées devaient être considérées, et la nécessité d'expliquer et d'impliquer les populations est devenue de plus en plus apparente. L'étape cruciale a été le travail de proposition puis de sélection d'un site. Dans plusieurs cas, les projets initiaux ont été stoppés et ont dû être repensés beaucoup plus globalement. C'est le cas par exemple, des USA, du Japon, du Royaume Uni, ... **La France ne fait pas exception à la règle**, comme cela sera décrit dans le prochain article.

Devant ce constat, au cours des années 1990, le caractère définitif des options de gestion des déchets de haute activité et à vie longue est rediscuté et la communauté internationale s'entend pour souligner l'importance de construire des solutions évolutives, tout en permettant une optimisation de l'affectation des ressources consacrées à cette gestion. On assiste alors à la réouverture des options possibles et à la prise en compte de la réversibilité dans les concepts étudiés afin de maintenir dans le temps la possibilité de le modifier.

4. Comment fonctionne un stockage géologique ?

Le principe consiste à d'isoler les déchets de manière à retarder la migration des radioéléments vers la biosphère et l'homme sur des durées suffisamment longues pour que leur activité devienne compatible avec les niveaux de radioactivité naturelle, soit plusieurs centaines de milliers d'années, en les plaçant dans des formations géologiques adaptées. Pour des formations géologiques stables (sans volcanisme par exemple), le vecteur de migration vers la surface est constitué des eaux souterraines. De même, pour des colis statiques, et dans lesquels les radioéléments sont fixés dans une matrice, l'agent de dégradation principal des colis et de mobilisation des radioéléments est aussi l'eau. Les concepts de stockage sont donc tout d'abord prévus comme un ensemble de dispositifs (barrières) successifs limitant la circulation d'eau vers le déchet. Une fois que le déchet relargue ses radioéléments dans l'eau, le concept de stockage met en œuvre des barrières physiques et chimiques pour limiter la circulation des radionucléides vers la surface.

Les premières barrières sont dites « ouvragées », c'est-à-dire fabriquées par l'homme. Il s'agit de la matrice dans laquelle les radioéléments sont fixés, du colis et de son surcolisage dont le matériau peut être très résistant (ex : les colis en cuivre des concepts suédois et finlandais), des matériaux de comblement et de scellement des cavités et tunnels (argiles gonflantes de type bentonite, bétons, matériau concassé), des ouvrages souterrains (tunnels, puits, alvéoles et autres structures) par lesquels les colis sont introduits et mis en place, ...

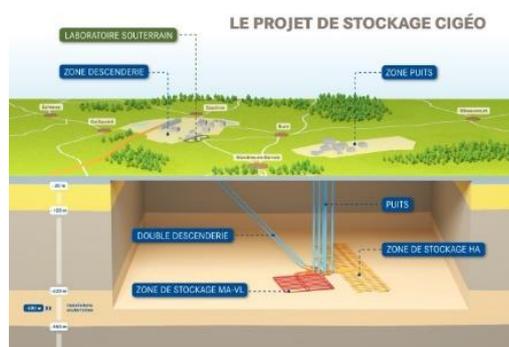


¹³ **La barrière ultime est la barrière géologique**, c'est-à-dire la roche hôte au sein de laquelle le site est construit. Cela peut être une roche anhydre (comme la formation saline du WIPP aux USA), une roche de type granitique (concepts suédois, finlandais, japonais), une couche d'argile très imperméable comme en France, des roches poreuses dans des sites désertiques où très peu d'eau est disponible, comme pour

le concept Yucca Mountain aux USA ou le concept préliminaire Chinois. La barrière géologique joue aussi un rôle primordial dans le retard à la migration des radioéléments par des mécanismes physico-chimiques tels que la diffusion, la sorption, la précipitation de phases insolubles. ¹⁴

Les divers concepts de stockage étudiés dans le monde sont des combinaisons spécifiques de tous ces éléments adaptés au contexte local de chaque pays. Les techniques utilisées pour construire ces sites s'apparentent à des techniques de minage classiques, et sont plutôt bien connues même si elles doivent être adaptées pour préserver la qualité de la roche.

L'évaluation de la performance à long terme du site met en œuvre de très nombreux programmes de caractérisation et des modélisations géologiques, physiques, chimiques, thermiques, complexes, mobilisant les techniques les plus avancées, pour refléter l'ensemble des interactions au sein du milieu, et pour évaluer l'évolution à long terme de la perturbation du milieu engendrée par la mise en place du stockage. Parmi les effets à prendre en compte on peut citer la dissipation de la chaleur résiduelle des colis de haute activité lors des premières centaines d'années, la production de gaz sous l'effet des mécanismes de corrosion, les impacts chimiques des matériaux mis en place, les perturbations géomécaniques, ... Le plus souvent, ces analyses sont accompagnées de démonstrations et de validations grandeur nature dans des laboratoires souterrains représentatifs du futur site, tels que le laboratoire de Bure, en France.



L'avancement des projets de stockage varie fortement entre les divers pays, pour des raisons techniques, politiques, législatives, économiques... En France les déchets HA et MA-VL sont destinés à être isolés dans une formation d'argile profonde de type Callovo-Oxfordien dans l'Est de La France. Cette formation a été retenue pour ses caractéristiques physico chimiques et géologiques exceptionnelles. Le futur centre de stockage (CIGEO Centre Industriel de stockage GEOlogique) est en phase d'APD (Avant-Projet Détaillé). La demande de déclaration d'utilité publique a été déposée le 3 Août dernier.

Deux articles à venir seront consacrés à la description des principaux projets internationaux en matière de stockage géologique. Le premier sera consacré au cas particulier de la France, et le dernier article décrira quelques concepts étrangers

¹³ Photo : L'argile du Callovo Oxfordien étudiée en France – Source : site de l'ANDRA

¹⁴ Pour plus d'informations : <https://youtu.be/2pXFby20Df4> , <https://youtu.be/xWzFkpixHPY>