

En première étape de l'étude, relevons les informations générales nécessaires pour contextualiser la problématique d'une recherche sur le son, et plus globalement des recherches impulsées dans le cadre du programme mémoire. En effet, celui-ci représente une partie des recherches menées par l'Andra, et bien qu'il cherche à relever des défis communicationnels et mémoriels inédits – dans l'immédiat à y apporter un maximum de réponses –, il s'inscrit dans un défi technique, technologique et civilisationnel plus large encore. Nous procéderons donc à une vue d'ensemble des éléments qui ont mené à la problématique d'enfouissement des déchets radioactifs et de construction d'une mémoire collective et pérenne. Nous débuterons par des informations générales sur le recours aux réacteurs nucléaires. Ils constituent la source la plus importante des déchets radioactifs notamment en vue de la production d'électricité. Ensuite, nous aborderons plus spécifiquement les déchets en eux-mêmes, pour enfin saisir l'ampleur du défi du stockage et de l'héritage qu'il construit.

CHAPITRE I. Exploitation de l'énergie nucléaire en France : production et traitement des combustibles

I.1. L'énergie nucléaire en France et dans le monde

I.1.1. Vue d'ensemble du nucléaire dans le monde

À l'échelle mondiale, le nucléaire ne représente qu'un faible pourcentage des sources d'énergie. En 2020, le parc nucléaire mondial compte 422 réacteurs nucléaires en fonctionnement répartis dans 31 pays, lesquels produisent 10 % de l'électricité mondiale⁶. À titre de comparaison, le charbon représentait 41%, et le gaz 22%⁷ en 2018. Malgré la décision de l'Allemagne de sortir du nucléaire, la plupart des pays européens affirment le prolongement du recours au nucléaire, et ce en modernisant les installations vieillissantes, ou décident de délaissier progressivement les énergies fossiles au profit de centrales de troisième génération⁸.

D'après le Forum Nucléaire,

« La capacité de production internationale de l'énergie nucléaire augmente depuis 4 ans et atteint actuellement un nouveau niveau record de plus de 399 000 MW. En 2018, cela représentait une augmentation de 3 % de la capacité. En d'autres termes, il n'y a jamais eu autant d'énergie nucléaire dans le monde (en termes de puissance installée) qu'aujourd'hui. L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) prévoit environ 1,1 billion de dollars d'investissements dans l'énergie nucléaire d'ici 2040, ce qui signifie une augmentation de 46 % de la production d'énergie nucléaire. »⁹

⁶ <https://www.francetnp.gouv.fr/l-energie-nucleaire-en-bref>

⁷ Société Française d'Énergie Nucléaire (SFEN), <https://www.sfen.org/energie-nucleaire/panorama-nucleaire/nucleaire-monde>

⁸ À l'instar du Royaume-Uni qui lançait en 2016 la construction de deux réacteurs EPR à Hinkley Point. https://www.edf.fr/edf/accueil-magazine/hinkley-point-c-c-est-parti?&mkwid=sZjPYqIna&pclid=181853281102&pkw=epr%20hinkley%20point&pmt=e&pdv=c&slid=&productid=&pgrid=39385277719&ptaid=kwd-289335245750&qclid=CjwKCAjww5r8BRB6EiwArcckC8drhxu_xNBLBdqP8i0GpYHH9XevAKBhHITG-oB9GGYTizA6knmEkhoClzcQAvD_BwE&qclsrc=aw.ds

⁹ Article 2020, <https://www.forumnucleaire.be/theme/dans-le-monde/lenergie-nucleaire-dans-le-monde-1>

Le développement de l'énergie nucléaire à échelle mondiale se profile en réponse à l'augmentation de la demande en électricité ainsi qu'aux objectifs de réduction des émissions de CO₂ – notamment selon les termes des accords Paris –, pour réduire progressivement le recours aux combustibles fossiles très polluants, encore très répandus.

À la fin d'année 2019, le nombre de centrales nucléaires en construction sur notre planète était de 53, dont 38 en Asie, notamment en Chine (11 réacteurs en construction) et en Inde (7). Pour atteindre son objectif de 10% de production électrique par le nucléaire d'ici à 2035, la Chine entreprend la construction d'une centaine de réacteurs¹⁰. La Russie comptait déjà pour sa part 25 réacteurs nucléaires en projet en 2018.

Sur le plan mondial donc, la production en électricité d'origine nucléaire ne devrait cesser d'augmenter au vu des projets de développement que les pays développés et émergents y consacrent.

I.1.2. L'énergie nucléaire en France

Le parc nucléaire français a été développé à partir des années 1970, pour répondre au manque d'énergies fossiles du territoire. Il est actuellement composé de 58 réacteurs répartis sur 19 sites. En France, le nucléaire représente la première source de production et de consommation d'électricité avec 71% de la production totale d'électricité. La France est ainsi le pays dont la production d'origine nucléaire est la plus importante rapportée à sa population ; en comparaison, les parts de production nucléaire en 2018 aux États-Unis et en Russie s'élevaient respectivement à 20,05% et 17,79%¹¹. Le tableau ci-contre (figure 1) représente la répartition de la production électrique interne à chaque pays en 2017¹².

| Pays | Production | en % |
|--------------|------------|--------|
| Etats-Unis | 804,9 TWh | 20,05% |
| France | 379,1 TWh | 71,61% |
| Chine | 247,5 TWh | 3,94% |
| Russie | 187,5 TWh | 17,79% |
| Corée du Sud | 141,1 TWh | 27,12% |
| Canada | 96,1 TWh | 14,64% |
| Ukraine | 85,6 TWh | 55,10% |
| Allemagne | 72,2 TWh | 11,63% |
| Royaume-Uni | 63,9 TWh | 19,27% |
| Suède | 63,1 TWh | 39,64% |

Figure 1. Production d'électricité d'origine nucléaire par pays en 2018.

Sources : edf.fr, International Atomic Energy Agency

Le nucléaire en France devrait poursuivre une production importante sur plusieurs décennies, ne serait-ce qu'à l'égard des évolutions techniques effectuées sur le chantier de l'EPR (European Pressurized Reactor, réacteur de troisième génération en construction à Flamanville), censées apporter plus de sûreté au dispositif de production, et un meilleur rendement. L'EPR doit préparer un rajeunissement du parc nucléaire vieillissant dont les installations datent des années 1970 à 1990. Le projet d'EPR vient répondre à trois enjeux futurs : le vieillissement des structures nucléaires, la nécessité de

¹⁰ <https://www.lemondedelenergie.com/nucleaire-dragon-chine/2020/05/06/>

<https://www.lemonde.fr/blog/huet/2019/06/28/nucleaire-les-ambitions-chinoises/>

¹¹ <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-nucleaire-en-chiffres#:~:text=Avec%20une%20production%20de%20,fonctionnement%2C%20r%C3%A9partis%20dans%2031%20pays.>

¹² *Idem.*

réduire les émissions de CO₂, et l'anticipation de l'épuisement des ressources fossiles¹³. Par-delà les problèmes de coûts engendrés par la mise en place de nouveaux réacteurs, le nucléaire reste en France une solution majeure à la demande grandissante d'énergie électrique.

Afin de cerner la nature des déchets radioactifs, observons à présent la nature du combustible le plus largement utilisé dans la production d'énergie atomique, et qui constitue par conséquent une grande part des déchets concernés par le projet de stockage géologique profond.

I.2. Cycle d'extraction, de traitement et d'exploitation des ressources radioactives

L'ensemble des réacteurs nucléaires français est composé de Réacteurs à Eau Pressurisée (REP)¹⁴ – les REP représentent 55% des installations dans le monde. Un réacteur de 2^{ème} génération (tel que nos réacteurs actuels) exploite la chaleur dégagée par la *fission* des atomes d'uranium (combustible utilisé par la quasi-totalité de ce type de réacteur¹⁵).

L'uranium, minéral métallique radioactif que l'on trouve naturellement en sous-sol, est extrait puis concentré, la concentration consistant en l'élimination des roches inexploitées et résultant par un concentré d'oxyde d'uranium. Le concentré est ensuite raffiné en vue de son *enrichissement*.¹⁶

L'uranium ainsi extrait est composé de deux isotopes¹⁷ : 99,3% d'*uranium 238* et 0.7% d'*uranium 235*. Seul ce dernier est *fissile*, c'est-à-dire qu'il peut être scindé lorsqu'il est bombardé de neutrons. C'est donc le seul isotope à pouvoir générer la réaction exploitée dans les réacteur nucléaires REP. La Société Française d'Énergie Nucléaire (SFEN), décrit ainsi la fission :

« Quand un noyau d'uranium 235 absorbe un neutron, il peut se fractionner en deux fragments. Ce phénomène, appelé "fission", génère une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur. Le principe d'un réacteur nucléaire consiste à récupérer cette chaleur pour chauffer un fluide et produire de la vapeur qui permettra d'activer la turbine. Chaque fission produit à son tour des neutrons d'énergie élevée qui, en se déplaçant parmi les atomes d'uranium 235 ou de plutonium, peuvent provoquer la fission d'un nouveau noyau d'atome d'uranium 235 et générer ainsi des réactions en chaîne (cascade de fissions). »¹⁸

Pour pouvoir exploiter le minéral, il est nécessaire d'enrichir l'uranium, c'est-à-dire augmenter la proportion d'uranium 235 pour qu'il soit exploitable en tant que combustible au sein des réacteurs REP. Le procédé d'enrichissement – que nous ne décrivons pas ici – permet d'obtenir entre 3 et 5 % d'uranium 235, originellement présent à hauteur de 0.7%.

¹³ <https://www.lemondedelenergie.com/epr-avenir-france-europe/2019/10/04/#:~:text=Une%20C3%A9tude%20r%C3%A9cente%20publi%C3%A9e%20par,rythme%20de%20construction%20soutenu%20dans>

¹⁴ En Anglais, PWR pour *Pressurized Water Reactor*.

¹⁵ Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), <https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energie-nucleaire/combustibles-nucleaires.aspx?Type=Chapitre&numero=2>

¹⁶ <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/enrichissement-de-l-uranium>

¹⁷ Des atomes partageant le même nombre de protons mais un nombre différent de neutrons.

¹⁸ SFEN, <https://www.sfen.org/energie-nucleaire/ca-marche/fonctionnement-centrale-nucleaire#:~:text=Les%20principaux%20atomes%20fissiles%20sont,dans%20le%20c%C5%93ur%20du%20r%C3%A9acteur.>

Une fois l'enrichissement effectué, l'oxyde d'uranium (UOX – *Uranium Oxide*) est conditionné sous forme de pastilles¹⁹ (d'environ un centimètre), empilées dans des tubes appelés « crayons combustibles »²⁰ (d'environ 4 mètres de long). Ces crayons, longues tiges métalliques contenant le combustible, sont assemblés²¹ par groupes de 264 unités et plongés dans l'eau qui sera ensuite chauffée par la réaction de fission, pour produire de la vapeur dans un autre circuit et actionner des turbines.

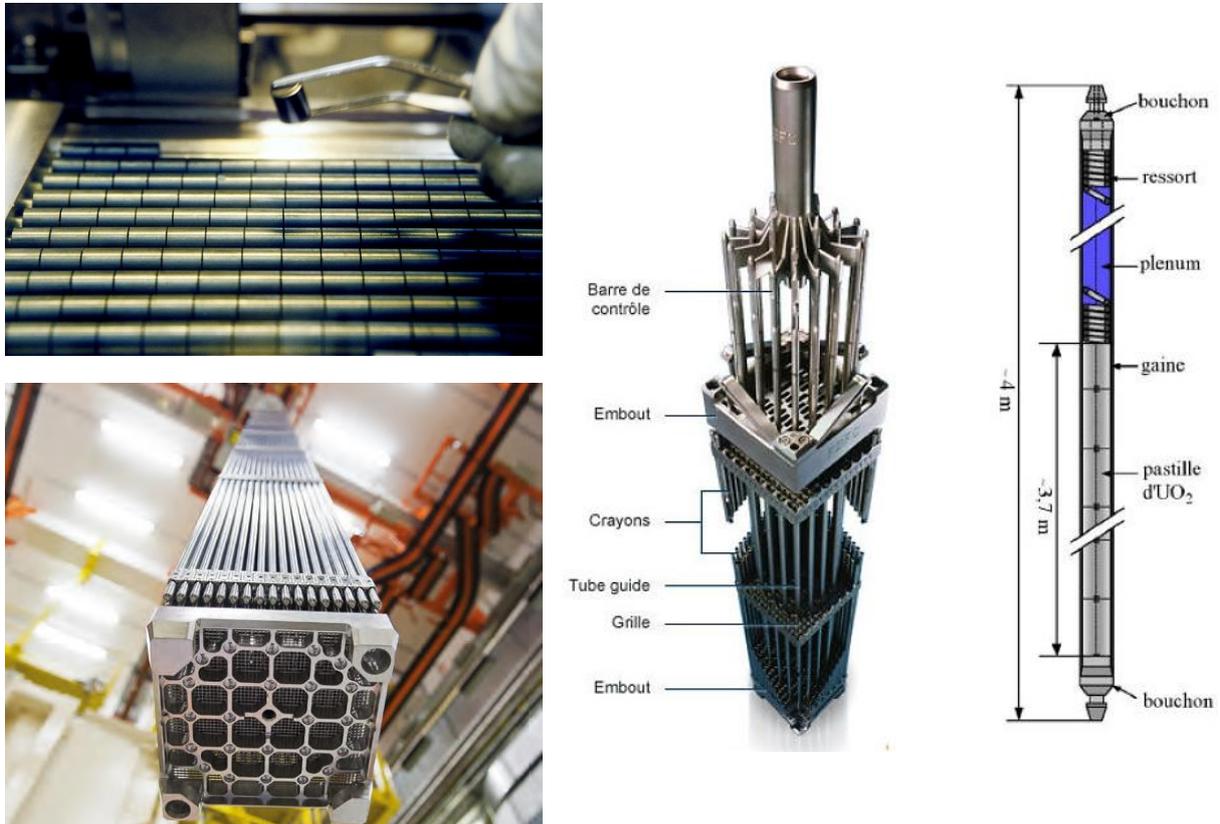


Figure 2.1. En haut à gauche – Pastille d'uranium enrichi.

Source : Le journal du CNRS, P. LANDMANN/SPL/COSMOS.

Figure 2.2. En bas à gauche – Barre de combustible (crayons assemblés).

Source : Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2014.

Figure 2.3. À droite – Description de la composition des barres de combustible. À gauche, assemblage d'un réacteur REP. À droite, crayon combustible.

Sources : Areva.com ; BLAIR P., *Modelling of fission gas behaviour in high burnup nuclear fuel*. PhD thesis, Citeseer, 2008 ; assemblage par ARAYRO J., *Etude théorique de bulles de gaz rares dans une matrice céramique à haute température : modélisation par des approches semi-empiriques*, Thèse, Aix Marseille Université, 2015.

Le combustible est exploité pendant 4 à 5 années au sein des réacteurs. Une fois devenu inexploitable du fait de l'épuisement en uranium 235, il est immergé dans une piscine de refroidissement (ou piscine de désactivation) pour y rester entreposé entre un et trois ans. Un autre entreposage d'une quinzaine d'années s'ensuit dans une usine de traitement (en France, cette usine est située à La Hague et gérée par ORANO, anciennement AREVA).

¹⁹ Voir figure 2.1.

²⁰ Voir figure 2.3.

²¹ Voir figures 2.2 et 2.3.

Ce sont ces combustibles qui constituent une grande part des déchets radioactifs issus de l'activité électronucléaire, mais surtout les déchets les plus problématiques au vu de leur temps de décroissance radioactive pouvant durer des millénaires. En effet, si les combustibles usés ne sont plus exploitables, ils continuent d'émettre des rayonnements ionisants dangereux pour les organismes vivants.

Eu égard à l'investissement engagé dans l'énergie nucléaire, la production de combustibles et par conséquent de déchets ne devrait pas s'arrêter avant au minimum 60 ans²². Par ailleurs, les recherches françaises sur les réacteurs de génération IV censés permettre une réutilisation des combustibles actuellement inexploitablement sont temporairement suspendues, ce qui laisse à penser que la production de déchets rapportée à la production d'électricité d'origine nucléaire ne risquera pas de diminuer avant plusieurs décennies.

I.3. Traitement des combustibles usés

Une fois que l'amenuisement de l'uranium 235 au sein des barres de combustibles n'en permet plus l'exploitation, deux types de gestions possibles se présentent. Dans le premier cas, le combustible usé peut soit faire l'objet d'un « stockage direct sans traitement ni recyclage », soit être entreposé dans l'attente d'un recyclage futur. Dans le second cas, le combustible est recyclé après quelques années de refroidissement²³.

Parmi les combustibles usés, 96% constituent une « matière valorisable » : il s'agit d'uranium et de plutonium qui peuvent être retraités en vue de générer un autre combustible. Les 4% restant sont des déchets ultimes, c'est-à-dire des produits issus de la fission inexploitablement, et les structures métalliques contaminées contenant le combustible.

L'uranium appauvri peut être retraité de sorte à obtenir de l'uranium de recyclage enrichi (URE), réutilisable dans certaines centrales. Le plutonium est également recyclé en combustible « MOX²⁴ », mélangé à de l'uranium. En France, le combustible issu de ce recyclage est exploité par 22 réacteurs, et représente 10% de l'électricité d'origine nucléaire²⁵. Cette réutilisation des combustibles usés permet à la France de fonctionner en « cycle fermé » sur certains réacteurs, ce qui n'est pas le cas de tous les pays exploitant l'activité électronucléaire. Malgré cela le cycle n'est pas indéfini et la matière recyclée devient à son tour obsolète : un seul cycle est possible grâce au MOX. Le recyclage permet toutefois de réduire le volume (par 5) et la radiotoxicité (par 10) des déchets, et d'« économiser 900 tonnes d'uranium naturel par an sur les 8 400 consommées »²⁶.

En France, le traitement des combustibles est réalisé à l'usine de La Hague²⁷, où sont entreposés les combustibles en phase de refroidissement dans l'attente d'un traitement, ainsi que les déchets radioactifs en attente d'une solution de stockage permanent.

²² Les réacteurs 3^{ème} génération en construction ont durée de vie estimée à 60 ans ; source : <https://www.connaissancedesenergies.org/quels-sont-les-reacteurs-nucleaires-de-3e-generation-140929>

²³ *Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger dans les installations d'Orano la Hague*, ORANO, Rapport 2017 , https://www.orano.group/docs/default-source/orano-doc/groupe/publications-reference/rapport-2017-la-hague-traitement-combustible-use-etranger.pdf?sfvrsn=6ec7b6ca_10

²⁴ *Mixed uranium and plutonium Oxide*.

²⁵ EDF.fr

²⁶ <https://lejournal.cnrs.fr/articles/nucleaire-lepineuse-question-du-combustible>

²⁷ Plus grande usine de retraitement du monde, elle traite également des combustibles usés venus de l'étranger. Une fois conditionnés, les déchets venus de l'étranger sont retournés au pays d'origine.

La problématique du recyclage des déchets fait l'objet de recherches, notamment menées par le CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives)²⁸. Ces recherches ont pour but d'« étendre les possibilités techniques d'utilisation de combustibles MOX »²⁹ et d'optimiser le retraitement des combustibles usés pour mettre en place un multirecyclage. Dans d'autres proportions, le CEA a engagé des recherches portées sur les réacteurs de génération IV, successeurs des réacteurs de 3^{ème} générations (EPR), lesquels sont encore en construction³⁰. Parmi les pistes, six systèmes sont étudiés par les membres du forum international « Génération IV »³¹ (au nombre de 14). Parmi ces systèmes, le CEA priorise les recherches sur les trois types de réacteurs à neutrons rapides (RNR). Si la question des ressources en uranium est problématique, la 4^{ème} génération doit permettre une exploitation bien plus importante des ressources et donc un bien meilleur rendement.

Les réacteurs RNR présentent à priori plusieurs avantages vis-à-vis de d'exploitation des combustibles et de la production de déchets. Tout d'abord, « *ils peuvent utiliser sans limitation tout le plutonium produit par le parc actuel des réacteurs à eau légère, ce qui permet d'assurer une gestion rationnelle et pérenne du plutonium* »³². Notons que le plutonium ne représente qu'une très faible partie du combustible nucléaire. Concernant l'uranium, ils ont pour vocation d'optimiser grandement l'usage du combustible, en amont du cycle comme en aval. En amont, le brûlage de l'uranium ne se limiterait plus à l'uranium 235 (qui, rappelons-le, ne représente que 0.7% de l'uranium extrait avant enrichissement et 3% à 5% une fois enrichi) :

*« En permettant de valoriser la totalité de l'uranium extrait du sol, ils multiplient par un facteur proche de 100 l'énergie que l'on peut extraire d'une masse donnée d'uranium naturel. Avec l'uranium appauvri présent sur le territoire français et le plutonium issu du combustible usé des centrales actuelles, les systèmes de quatrième génération à neutrons rapides pourraient fonctionner pendant plusieurs milliers d'années en se passant totalement d'uranium naturel. »*³³

En aval, les RNR permettraient de réduire la quantité et la nocivité des déchets produits : « *Les stocks de plutonium peuvent être "brûlés" et les actinides mineurs, hautement radioactifs et à vie longue, peuvent être fissionnés en éléments plus faciles à stocker en raison de leur durée de vie relativement courte (de l'ordre de 300 ans)* »³⁴.

Les technologies futures de l'industrie nucléaire nourrissent donc de grands espoirs vis-à-vis de l'optimisation du cycle et du multirecyclage, ce qui demanderait une extraction bien moins importante des gisements d'uranium. La production de déchets radioactifs serait elle aussi limitée dans son impact en termes de quantité, de toxicité et de durée de décroissance radioactive.

²⁸ En partenariat avec EDF et Orano.

²⁹ <https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energie-nucleaire/dossier-cycle-du-combustible-nucleaire.aspx?Type=Chapitre&numero=4>

³⁰ Cea.fr

³¹ En anglais, *Generation IV international Forum* (GIF). Il s'agit d'une initiative de recherche et développement visant à développer la maîtrise des technologies les plus performantes.

³² <https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energie-nucleaire/reacteurs-nucleaires-futur.aspx?Type=Chapitre&numero=1>

³³ *Idem*.

³⁴ <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/astirid-reacteur-nucleaire-a-neutrons-rapides>

Néanmoins, le déploiement de cette génération, initialement prévu pour l'horizon 2040-2050, semble difficilement accessible depuis l'arrêt temporaire (et indéfini) du projet ASTRID³⁵ en Septembre 2019³⁶. L'horizon d'une réduction aussi conséquente des matières premières nécessaires et de la production de déchets s'éloigne alors que les faisceaux des problématiques financières et politiques se croisent, notamment au vu de la pression exercée pour tendre vers des énergies « renouvelables » : hydroélectrique, photovoltaïque, éolien, hydrolien pour ne citer qu'elles.

³⁵ Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration, ASTRID est un programme de démonstrateur industriel pour un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (sources : connaissancedesenergies.org ; cea.fr)

³⁶ <https://www.futura-sciences.com/sciences/breves/energie-france-abandonne-son-reacteur-nucleaire-4e-generation-1104/>
https://www.lemonde.fr/economie/article/2019/08/29/nucleaire-la-france-abandonne-la-quatrieme-generation-de-reacteurs_5504233_3234.html

CHAPITRE II. Gestion des déchets radioactifs

II.1. Les sources de déchets radioactifs

Bien que l'activité électronucléaire constitue la première source de déchets radioactifs, ceux-ci sont très divers et émanent de secteurs différents. Pour cause, l'exploitation de la radioactivité ne se restreint pas à l'utilisation de combustibles par des centrales nucléaires. L'armement, le milieu médical et la recherche exploitent aussi la radioactivité à des fins variées et constituent par conséquent autant de sources de déchets radioactifs. Le nombre de producteurs de déchets en France s'élève à près de 1200³⁷. Les déchets peuvent être de nature diverse³⁸, par exemple, tout objet ayant été exposé à une radioactivité importante ou prolongée devient un déchet radioactif, c'est ainsi que des objets et matériaux exposés à des rayonnements, par exemple dans un cadre industriel autre que l'électronucléaire, représentent un danger pour la santé humaine et sont de ce fait inexploitable : ils deviennent des déchets radioactifs.

Parmi les sources d'origine industrielle non électronucléaire, l'industrie alimentaire produit des déchets par le biais de la technique d'ionisation des aliments, qui permet « d'éliminer les insectes, parasites et bactéries, permettant ainsi une meilleure conservation des produits »³⁹. Les technologies spatiales utilisent des batteries au plutonium ou au cobalt pour alimenter certains satellites. L'extraction des terres rares, utilisées pour la fabrication de composants technologiques est l'une des sources principales de l'industrie autre qu'électronucléaire.

Le secteur de la défense produit des déchets issus de l'armement nucléaire, des systèmes de sondage faisant appel à la radioactivité et des sous-marins nucléaires.

Le secteur médical fait appel à la radioactivité de diverses manières. C'est le cas des instruments de diagnostic, notamment la radiographie et le scanner qui utilisent des rayons X, et la scintigraphie ; la radiothérapie fait également appel au rayonnement pour traiter notamment des cellules cancéreuses, lequel est généré par exemple par des cyclotrons ou appareils de tomothérapie. Les pratiques de médecine nucléaire produisent ainsi des déchets variés, qu'il s'agisse de liquides ou d'objets contaminés.

Des objets du quotidiens sont également recensés : il s'agit de produits issus de la première moitié du XXème siècle. Des années 1920 aux années 1950, la radioactivité encore mal comprise et connue était perçue comme une énergie bienfaitrice pour le corps⁴⁰. Devenue produit marketing, de nombreux objets ont été conçus autour du radium ou bien en y faisant appel comme valeur ajoutée pour le bien-être du consommateur. C'est ainsi que sont nés des « fontaines à radium », censées enrichir l'eau en radon, des produits cosmétiques et pharmaceutiques de toutes sortes censés stimuler les cellules et apporter jeunesse. La phosphorescence était également exploitée et appliquée, notamment sur les montres et les horloges (durant les années 1940-1950), ou encore sur des bijoux pouvant briller dans l'obscurité ! Nombre d'objets du quotidien ont ainsi habité les foyers au début du XXème, et

³⁷ <https://www.andra.fr/les-dechets-radioactifs/tout-comprendre-sur-la-radioactivite/qui-en-produit-aujourd'hui>

³⁸ *Inventaire national des matières et déchets radioactifs*, Agence Nationale de Gestion des Déchets Radioactifs, Rapport de synthèse 2018.

³⁹ Andra.fr

⁴⁰ <https://www.andra.fr/les-dechets-radioactifs/tout-comprendre-sur-la-radioactivite/les-premiers-dechets>

certain d'entre eux peuvent encore être croisés, même si nous les considérons aujourd'hui comme des déchets radioactifs.

La recherche produisant des déchets radioactifs est menée dans de nombreux domaines, en vue d'applications dans les principaux secteurs cités (nucléaire, médical, défense), mais aussi dans le domaine de la physique, de la chimie, de la biologie, etc. À la fin 2018, la répartition du volume de déchets radioactifs par secteur économique⁴¹ était la suivante (figure 3) :

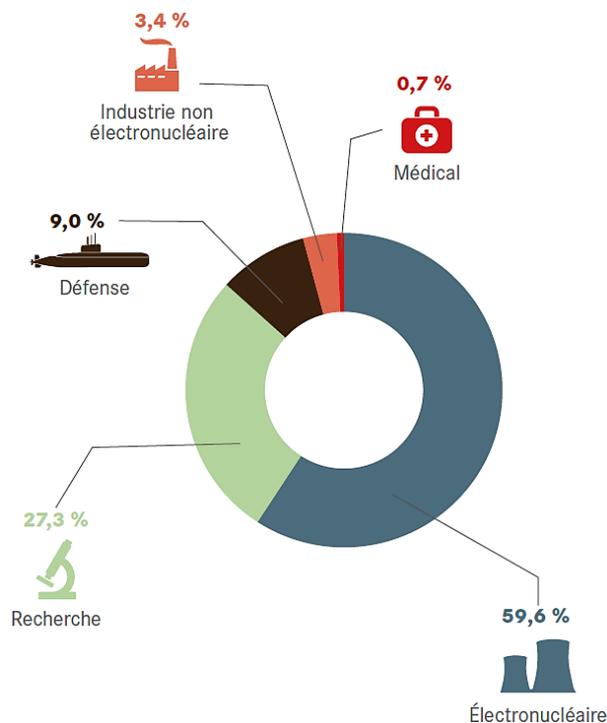


Figure 3. Volume de déchets radioactifs par secteur économique à la fin 2016.
Source : Andra.fr ; *Inventaire national des matières et déchets radioactifs, 2020.*

Enfin, les déchets émanant du secteur électronucléaire – qui produit plus de la moitié des déchets radioactifs – sont issus de la production d'énergie (du combustible utilisé), du recyclage de ce combustible usé, ainsi que du démantèlement des installations nucléaires.

Au total, la quantité de déchets radioactifs produits au terme de l'année 2018 représentait 1 640 000 m³.

II.2. Classification et gestion des déchets radioactifs

II.2.1. Classification des déchets

La grande diversité des déchets demande une classification qui permette d'envisager et d'organiser leur gestion. Deux paramètres ont été retenus en France pour les décrire et les classer :

- Le niveau de radioactivité (exprimée en Becquerel – Bq) : très faible, faible, moyenne et haute.

⁴¹ <https://www.andra.fr/les-dechets-radioactifs/tout-comprendre-sur-la-radioactivite/qui-en-produit-aujourd'hui>

- La durée de vie (ou période radioactive) : très courte, courte et longue⁴²

Le système français classe donc les déchets radioactifs en six catégories :

1. Vie très courte (VTC)
2. Très faible activité (TFA),
3. Faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC),
4. Faible activité à vie longue (FA-VL),
5. Moyenne activité à vie longue (MA-VL),
6. Haute activité (HA).

Les déchets à vie très courte (VTC) proviennent principalement du secteur médical, ceux à très faible activité (TFA) du démantèlement d'installations et d'équipements issus de l'industrie nucléaire et de de l'industrie (gravats, ferrailles). Les FMA-VC, ou de faible et moyenne activité à vie courte, sont également issus de l'industrie nucléaire et de la recherche, notamment menée par le CEA, les hôpitaux et universités (vêtements, outils, et filtres). Les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) sont issus de sources variées : d'une part les objets radioactifs de la première moitié du XXème siècle (montres, objets de soin, fontaines au radium, paratonnerres, détecteurs d'incendies), d'autre part de l'assainissement de sites pollués et des premières centrales nucléaires, ainsi que des traitements de minéraux dans le processus d'exploitation des terres rares. Leur radioactivité est due à la présence de radon, pour les déchets radifères et aux isotopes radioactifs, tels le chlore 36, présents comme impuretés dans le graphite (forme cristalline du carbone) utilisé dans les réacteurs de première génération, dits UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz).

Les déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL) sont issus en majorité du traitement des combustibles usés des centrales nucléaires. Ils sont pour la plupart constitués des parties métalliques qui entourent le combustible (les gaines, barres et coques qui le contiennent et assemblent les différentes parties), ainsi que de résidus produits par les différents traitements d'effluents et de combustibles.

Enfin, les déchets de haute activité (HA) sont constitués de matières non recyclables, c'est-à-dire entre 3 et 5% des combustibles utilisés dans les réacteurs nucléaires. Les résidus hautement radioactifs issus du traitement du combustible sont entreposés dans des cuves sous forme liquide avant d'être conditionnés en vue du stockage.

La durée de vie des déchets considérée dans la classification française actuelle est déterminée par la nature majoritaire des radionucléides qu'ils contiennent. Ainsi la période⁴³ des radionucléides des VTC (vie très courte) est de 100 jours, celle des déchets VC (à vie courte), est inférieure ou égale à 31 ans, et celle des déchets VL (à vie longue) est supérieure à 31 ans.

⁴² Andra.fr ; Asn.fr ; IRSN.fr (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) ; La plupart des informations données dans cette partie sont issues des sites et rapports de l'Andra et de l'ASN.

⁴³ La période radioactive est l'espace de temps au bout duquel un radionucléide a perdu la moitié de sa radioactivité initiale. Après deux périodes, il ne restera qu'un quart de sa radioactivité initiale, après trois, un huitième, etc.

L'inventaire national des matières et déchets radioactifs⁴⁴ (figure 4) représente leur classification dans le tableau suivant :

| 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 |  |
| Haute activité (HA) | Non applicable | | |

Figure 4. « Classification des déchets radioactifs et filières de gestion associées ».

Source : Andra, *Inventaire national des matières et déchets radioactifs*, 2020.

L'Andra, Agence Nationale de gestion des Déchets Radioactifs, est chargée du contrôle et de la gestion de ces déchets, c'est-à-dire pour une part de ceux-ci de leur traitement et conditionnement, et pour l'ensemble, de leur stockage. Le choix de la France en matière de gestion de déchets radioactifs est celui d'un stockage. Ce stockage peut être, en fonction de la nature des déchets, en surface, à faible profondeur (de quelques dizaines de mètres jusqu'à 200 mètres sous terre) et en profondeur (environ 500 mètres sous terre).

Selon leurs caractéristiques, et selon les deux paramètres de radioactivité et de durée de vie, les déchets connaissent une gestion appropriée à chaque catégorie, et sont entreposés ou stockés soit en des lieux dédiés au stockage (tels qu'évoqués), soit à proximité des sites qui les produisent ou les traitent.

II.2.2. Conditionnement, entreposage et stockage

Ainsi, les déchets à **vie très courte** (VTC) sont placés dans des cuves de décroissance pour une durée d'environ 3 ans (soit dix fois la période des radionucléides qui les composent), en attendant que la radioactivité diminue et ne représente plus de danger pour tout organisme vivant. Ces cuves sont stockées au sein ou à proximité des installations nucléaires ou des usines.

Les déchets de **très faible activité** (TFA) ont une durée de vie variable. Ils sont stockés sur le Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage (CIRES)⁴⁵ géré par l'Andra et situé dans l'Aube. Ils y sont reconditionnés ou compactés en vue d'un stockage en surface. Des contenants métalliques (conteneurs, fûts) ou des sacs sont placés dans des « alvéoles » par couches successives recouvertes de sable puis d'argile pour un stockage au long terme (voir figures 5.1 et 5.2).

⁴⁴ *Op.cit.*

⁴⁵ Il s'agit d'un des trois sites de stockage en surface de l'Andra.



Figure 5.1. Intérieur d'une alvéole en cours d'exploitation.
Source : aube.andra.fr

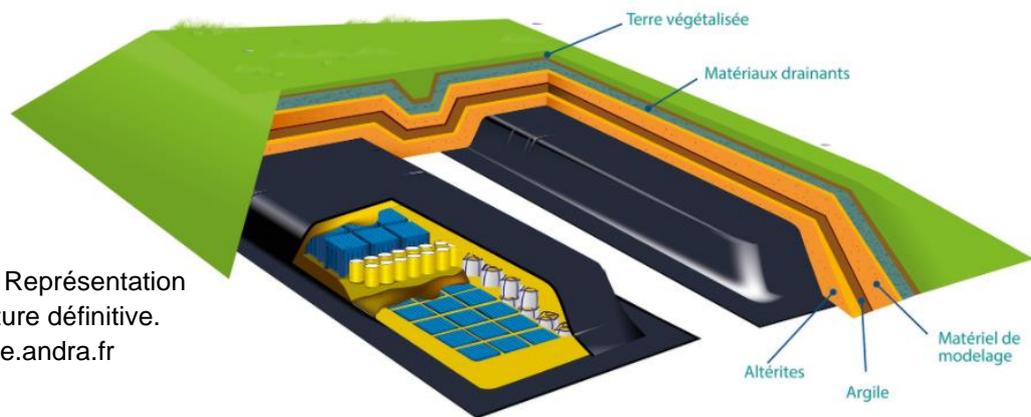


Figure 5.2. Représentation de la couverture définitive.
Source : aube.andra.fr

Les déchets dits de **faible et moyenne activité à vie courte** (FMA-VC) arriveront à un niveau de radioactivité quasi-inexistant au bout de trois siècles. Malgré une durée de vie importante à l'échelle humaine (mais courte à l'échelle des radionucléides), leur faible radioactivité permet de les stocker en surface. Leur conditionnement est varié, tout comme leur nature : les liquides sont solidifiés, les objets peuvent être incinérés et/ou compactés, puis placés dans des conteneurs en métal et enfin enrobés de béton. Deux sites de stockage accueillent ce type de déchets : le Centre de Stockage de la Manche (CSM) et le Centre de Stockage de l'Aube (CSA).

Le Centre de Stockage de la Manche (figure 6), situé à La Hague, est le premier centre de stockage français, exploité de 1969 à 1994. L'exploitation du site est terminée, le centre est en phase de fermeture et fait l'objet d'une surveillance active, avec présence d'une équipe sur le site et des relevés permanents de la radioactivité, de l'état des installations et observations diverses de l'environnement. Des modernisations et optimisations sont également prévues pour le matériel de surveillance ainsi que pour les structures de recouvrement. Il regroupe également tous les documents nécessaires à la description du site (synthétiques et détaillés), pour en conserver la mémoire et la maîtrise.

Le Centre de Stockage de l'Aube (figure 7.2) est entré en exploitation en 1992 pour prendre la suite de son prédécesseur dans la Manche (CSM). C'est là que sont conditionnés les déchets FMA-VC. Les fûts métalliques enrobés de béton sont placés dans des cases de bétons appelées « ouvrages » (figure 7.1), au nombre de 400. Une fois remplies, les cases

sont scellées. Elles seront recouvertes à terme d'une couverture multicouche. L'exploitation est encore prévue pour une cinquantaine d'années, le site entrera ensuite dans la phase de surveillance qui devra durer 300 ans, soit le temps de la décroissance radioactive des déchets.



Figure 6. À gauche - Centre de Stockage de la Manche.

Source : Andra

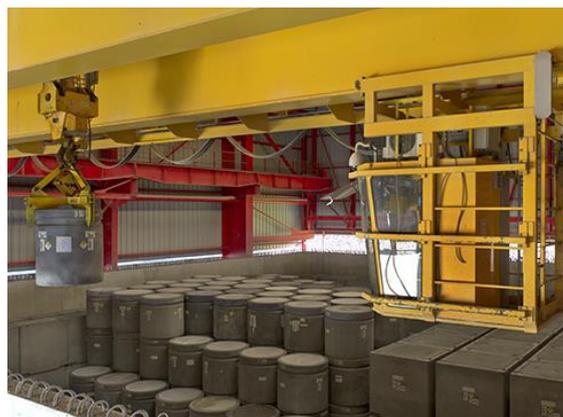


Figure 7.1. Ci-dessus – Déchets conditionnés au CSA et placés dans un ouvrage.

Source : aube.andra.fr

Figure 7.2. À gauche – Site de Stockage de l'Aube.

Source : aube.andra.fr

Les déchets radioactifs stockés en surface dans les trois centres présentés représentent 90% de la quantité totale des déchets produits. Les autres types de déchets (FA-VL, MA-VL et HA) n'ont pas encore de solution de stockage définitif. Ces solutions font l'objet de recherches afin de proposer des modalités adaptées à la nature des déchets.

Les radionucléides composant les déchets **faible activité à vie longue** (FA-VL) ont une période radioactive supérieure à 31 ans. Ils sont provisoirement entreposés sur leurs lieux de production dans l'attente de la création du centre capable de les accueillir. La solution envisagée pour ce type de déchets et celle du stockage dans une couche d'argile à faible profondeur (une vingtaine de mètres), soit par terrassement, soit par creusement.

Les déchets de **moyenne activité à vie longue** (MA-VL) sont stockés sur les lieux de traitement. Les parties métalliques contenant les combustibles sont cisailées, compactés en galettes avec les autres objets contaminés et placés dans des colis en acier inoxydable.

Les déchets de **haute activité** (HA), également à vie longue, sont le résultat des traitements de combustible usé. Une fois les matières valorisées séparées des déchets ultimes, ces derniers sont placés sous forme liquide dans des cuves pendant quelques mois avant d'être vitrifiés : après avoir été calcinés, ils sont incorporés dans un verre spécifique, puis fondu dans des conteneurs en acier inoxydable (figure 8.1). Ces colis sont entreposés pour la majeure partie à l'usine de traitement Orano de La Hague (figure 8.3), ainsi qu'à Marcoule. Leur radioactivité peut durer jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années.



Figure 8.1. À gauche – Remplissage des conteneurs HA de verre.

Source : P.Lesage/Orano



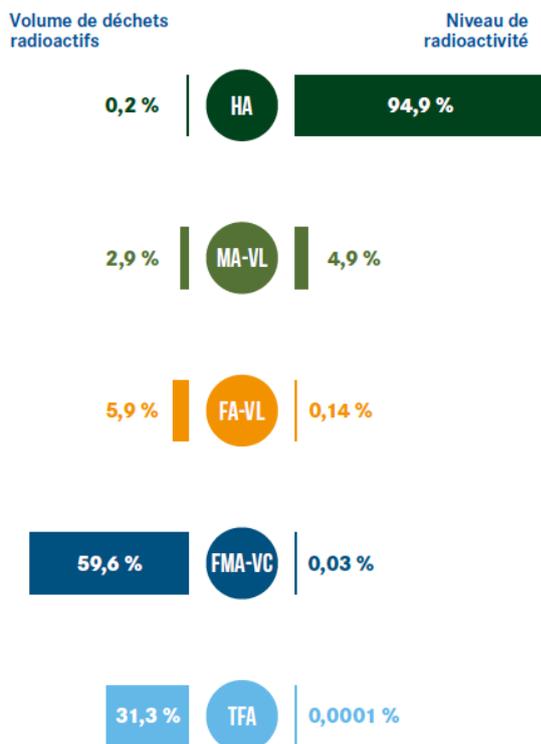
Figure 8.2. Ci-dessus – Conteneur HA rempli de déchets vitrifiés.

Source : P.Lesage/Orano



Figure 8.3. À gauche – Entreposage des déchets HA, usine Orano, La Hague.

Source : E. Larrayadiou/Orano



Au total, les déchets MA-VL et HA ne représentent qu'une faible part des déchets radioactifs, mais la très grande majorité de la radioactivité émise par la totalité des déchets produits (voir figure 9).

Figure 9. À gauche – Répartition des volumes et niveaux de radioactivité à la fin 2016.

Source : Andra, *Inventaire national des matières et déchets radioactifs*, 2020.

Les catégories MA-VL et HA ont toutes deux une décroissance radioactive de plusieurs dizaines de milliers d'années. Ce sont les déchets les plus problématiques en termes de stockage : ils doivent faire l'objet d'un stockage à très long terme et en profondeur, à 500 mètres sous terre, sur le site de Cigéo. Mais un tel projet engage un (des) défi(s) civilisationnel(s) majeur(s).

CHAPITRE III. Stockage des déchets radioactifs à vie longue : présentation du projet d'enfouissement

III.1. Recherches et solutions de gestion des déchets

L'Andra intervient dans le cadre législatif de la loi sur la gestion des matières et des déchets radioactifs du 28 Juin 2006 – reformulant elle-même les principes de la loi Bataille de 1991⁴⁶. Trois axes de recherches y sont définis. Le premier porte sur le traitement des matières jusqu'alors non valorisables⁴⁷ à l'origine des déchets HA (haute activité), en vue de l'optimisation de leur gestion. Cet axe doit répondre si oui ou non, une amélioration est possible et si elle peut être complémentaire au stockage en couche profonde⁴⁸. Le deuxième, porté par l'Andra, implique des recherches sur la sûreté de l'entreposage des déchets à vie longue. L'entreposage est une solution de « stockage » provisoire, qui demande le développement de protocoles, d'observations et de technologies susceptibles de perdurer en cadre industriel sur le long terme. Enfin, le troisième et dernier axe est celui de la mise en place d'un stockage en couche géologie profonde pour les déchets à vie longue – MA-VL et HA, également géré par l'Andra⁴⁹.

Les recherches sur la séparation et la transmutation ont mené l'Autorité de Sûreté Nucléaire à la conclusion d'une non-faisabilité. De plus, dans le cas où la technique deviendrait possible, elle ne permettrait pas de traiter la totalité des déchets à vie longue. Cela a mené l'ASN à considérer que le stockage en couche géologique profonde était une voie à développer, car bien plus viable et sûre qu'un entreposage temporaire. Même si les recherches des deux premiers axes sont poursuivies, les résultats de chacun de ces axes confirment la nécessité d'une solution de stockage pérenne.

La solution de l'enfouissement des déchets vient en réponse à des durées de vie radioactive qui dépassent largement tout référentiel de nos civilisations humaines en termes de projection dans le temps⁵⁰. La décroissance radioactive des MA-VL et HA, avant que d'atteindre un niveau qui ne soit plus dangereux pour les humains, et l'environnement en général, peut prendre entre quelques milliers d'années et plusieurs dizaines de milliers d'années – jusqu'à 100 000 ans. Les recherches engagées en 1991 et encadrées par loi du 28 juin 2006 ont pour objectif de rechercher au plus tôt des réponses à un problème pluriséculaire, lié à des substances pouvant représenter un danger sur de nombreuses générations. Le cadre civilisationnel (politique, financier, institutionnel, et technologique) est encore favorable au développement de solutions et de techniques pour le problème des déchets produits depuis les années 1950 – chose qui n'est pas considérée comme acquise à l'échelle des décennies futures. À ce titre, le choix actuel est celui d'assumer la responsabilité de cette production dangereuse en engageant des recherches pour trouver les meilleures réponses à cette question.

⁴⁶ ASN, IRSN, CEA.

⁴⁷ Plus précisément, la séparation/transmutation des éléments radioactifs.

⁴⁸ https://www.irsn.fr/dechets/cigeo/Documents/Fiches-thematiques/IRSN_Debat-Public-Cigeo_Fiche-Transmutation.pdf

⁴⁹ https://www.irsn.fr/dechets/cigeo/Documents/Fiches-thematiques/IRSN_Debat-Public-Cigeo_Fiche-Entreposage.pdf

⁵⁰ Sauf, peut-être, si l'on croit à une existence éternelle. Mais alors, il y a de fortes chances que cette existence ne permette pas de faire perdurer les projets menés sur terre dans nos corps biologiques et sur des périodes aussi longues.

Le choix du stockage profond n'est pas une exclusivité française. D'autres pays ont opté pour cette solution, et certains d'entre eux (États-Unis, Allemagne et Finlande) disposent déjà d'installations souterraines où sont stockés des déchets, dans le sel ou le granite. Parmi les pays les plus avancés en termes de gestion des déchets par stockage en couche géologique profonde, la France se situe aux côtés de la Finlande et de la Suède ; l'exploitation de leurs sites devrait débuter dans la décennie. Le Canada, la Suisse, le Royaume-Uni, l'Allemagne et la Belgique ont pour leur part engagé des recherches portant sur le stockage qui n'aboutiront pas à une exploitation avant 2040. Actuellement, l'Andra pilote un projet de recherche et développement européen nommé EURAD (European Joint Programme on Radioactive Waste Management), qui a pour objectif de mettre en commun les connaissances scientifiques et techniques dégagées par les recherches que mènent les 23 pays membres⁵¹.

Cigéo (pour *Centre industriel de stockage géologique profond*), fruit de recherches lancées en 1991, a pour vocation d'étudier la faisabilité et la viabilité d'un stockage des déchets à vie longue en profondeur. Dans l'immédiat, le site abrite un laboratoire où tous types de relevés, d'analyses, de mesures et d'expériences sont effectuées pour répondre au défi technique du stockage de déchets à 500 mètres sous terre, qui plus est de déchets radioactifs pour une grande part à l'activité très élevée. Ce site est situé entre la Meuse et la Haute-Marne, plus exactement à Bure. Les résultats ont abouti au choix d'un stockage profond pour la gestion de ces déchets – envisagé depuis les années 1960 –, avec une construction qui pourrait débuter à l'horizon 2025 et le démarrage de l'exploitation à l'horizon 2035⁵².

III.2. Caractéristiques géologiques et recherches sur site

Depuis 1991, les recherches sur site ont porté sur la nature du milieu géologique, des propriétés de la couche argileuse, notamment vis-à-vis du déplacement des radioéléments, sur les effets des déchets radioactifs sur la roche et, enfin, sur l'évolution climatique en surface et son impact du point de vue de l'érosion. Pour le moment, et jusqu'à l'autorisation de construction du centre de stockage Cigéo, il n'y a sur le site, comme installations souterraines, qu'un laboratoire de recherches. Le site de Bure est aussi le lieu d'observations détaillées de l'environnement appuyées par des recueils de données sur la qualité de l'eau, de l'air, des sols, sur la biodiversité (faune et flore). L'Andra a mis en place à cet effet l'Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE), dont les observations doivent être menées durant la phase de recherche (actuelle), la phase d'installation et la phase d'exploitation du site jusqu'à fermeture. Dans le souci de permettre la comparaison des éléments d'analyse recueillis, de nombreux échantillons sont conservés par cryogénéisation (-170°C), surgélation (-80°C) ou en sec dans une pédothèque (18°C), au sein d'une banque d'échantillons nommée « Ecothèque »⁵³.

Le choix du site est dirigé en premier lieu par la nature du sous-sol, et plus précisément de la couche géologique susceptible d'accueillir des déchets radioactifs émettant de la chaleur. Le creusement à 500 mètres sous la surface est conçu pour atteindre une couche argileuse (le calovo-oxfordien) d'une épaisseur de 140 à 160 mètres. Situé dans une zone à très faible sismicité, le calovo-oxfordien est ciblé pour ses propriétés : il présente une bonne résistance à la diffusion des radionucléides, ralentit le déplacement de l'eau (qui se déplace de seulement quelques centimètres en 100 000 ans), et constitue une couche stable depuis 160 millions

⁵¹ <https://www.andra.fr/eurad-un-programme-de-recherche-europeen-collaboratif-sur-les-dechets-radioactifs>

⁵² Une frise chronologie de l'histoire du projet est disposée en annexe 1.1.

⁵³ Ope.andra.fr. En 2017, 71 tonnes d'échantillons étaient conservées au sein de l'Ecothèque.

d'années. Autre critère favorable à une implantation de Cigéo sur le site de Meuse/Haute-Marne, le sous-sol ne contient pas de ressource naturelle exceptionnelle. C'est une des conditions permettant de rendre improbable un forage futur qui pourrait altérer les structures de l'installation.

Le laboratoire dans les galeries souterraines permet d'étudier le comportement et l'évolution de cette couche géologique, l'endommagement de la roche lié aux opérations de creusement et de l'activité sur le site (perméabilité, gonflement), et l'impact du réchauffement que peuvent provoquer les déchets (température de la roche, pression de l'eau, déformations).

Enfin, les recherches⁵⁴ portent également sur les différentes solutions industrielles possibles pour le creusement, le soutènement, la mise en place des galeries et alvéoles, l'utilisation d'outils et machines spécifiques, l'exploitation du site (acheminement des colis radioactifs, disposition dans les alvéoles, maintenance des installations industrielles), sa fermeture (le scellement) et enfin les modalités de réversibilité.

Le principe de réversibilité, aujourd'hui pris en compte dans les études de l'Andra, est à la fois « une demande citoyenne forte, exprimée notamment lors du débat public de 2005-2006 » et « une exigence parlementaire, inscrite dans la loi du 28 juin 2006 »⁵⁵. La réversibilité consiste en une période durant laquelle il doit être possible de décider de la poursuite de l'exploitation du site ou d'une autre gestion pour les déchets enfouis. L'objectif est de ne pas prendre des décisions irréversibles et de laisser une marge de manœuvre pour les générations futures, qu'il s'agisse de modifications ou améliorations du site (principe d'adaptation), ou d'une récupération des colis en vue d'un remplacement par des solutions nouvelles.

III.3. Projet Cigéo : planning et exploitation du site

Pour que Cigéo devienne un centre de stockage, il faudra que l'État émette une réponse favorable à la demande d'autorisation déposée par l'Andra en 2021-2022. Dans l'immédiat, L'emprise prévue pour les installations souterraines de Cigéo se trouve à l'intérieur de la ZIRA : zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie⁵⁶. Cette zone, qui représente 28,5 km² en surface, accueille aujourd'hui les galeries souterraines construites pour les recherches. Elle a été définie sur la base d'observations en amont : relevés cartographiques, forages pour l'étude



Figure 10. Puits d'accès au laboratoire souterrain (à gauche) et galeries (à droite).

Source : Andra.

⁵⁴ Dont certaines sont l'œuvre de coopérations européennes.

⁵⁵ *Le projet Cigéo. La réversibilité de Cigéo*, Andra, 2013. En ligne : <https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/526.pdf>

⁵⁶ Voir annexe 2.

des roches en sous-sol, campagnes d'études sismiques. Les galeries déjà creusées constituent un réseau de plus de 2000 mètres⁵⁷ (figure 10).

Une fois les installations terminées, le futur centre de stockage entrera en exploitation pour une durée allant de 115 à 125 ans. Au terme d'une centaine d'années d'exploitation, cette installation s'étendra sur une surface d'environ 15 km². Néanmoins la construction des galeries et alvéoles qui accueilleront les déchets se fera progressivement, notamment en raison du principe de réversibilité, c'est-à-dire dans l'éventualité où la gestion des déchets change, ou bien le centre ferme pour diverses raisons que nous ne pouvons encore connaître. De même, les galeries seront scellées au fur et à mesure du remplissage des alvéoles de stockage.

Comme nous pouvons le voir sur la figure 11 (ci-dessous), deux zones d'installation seront occupées en surface, l'une correspondant aux puits (qui servira « aux travaux de creusement et construction des ouvrages souterrains »⁵⁸), et l'autre constituant la zone de descenderie : c'est là que les colis de déchets seront réceptionnés, contrôlés et reconditionnés⁵⁹ pour ensuite être envoyés vers la zone de stockage.

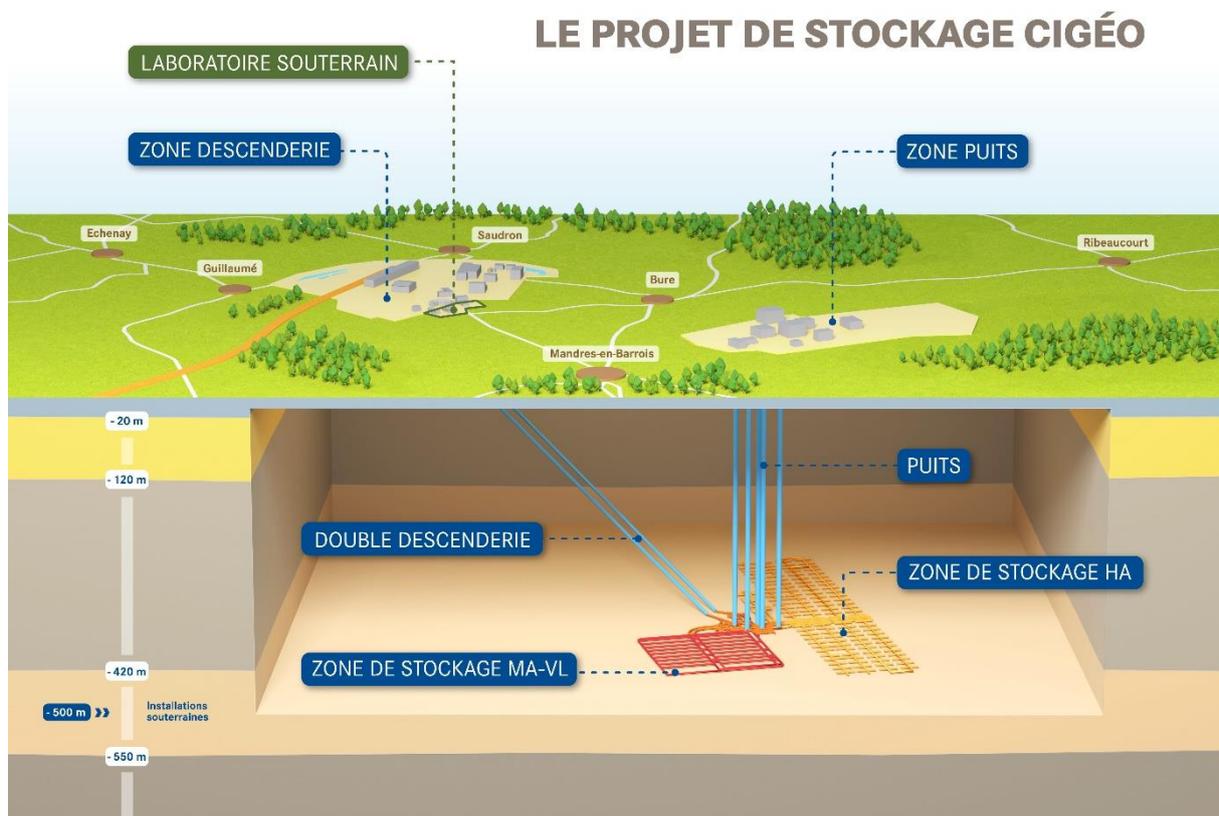


Figure 11. Coupe représentant une vue d'ensemble du site Cigéo en phase d'exploitation (horizon 2035).
Source : Andra.

L'installation du stockage profond est ainsi décrite par l'Andra :

⁵⁷ Cigeo.gouv.fr

⁵⁸ <https://www.andra.fr/cigeo/les-installations-et-le-fonctionnement-du-centre/les-installations-et-leur-localisation>

⁵⁹ Voir annexes 3.1 et 3.2.

« Les déchets seront stockés, au moyen de dispositifs robotisés, dans des tunnels horizontaux appelés alvéoles⁶⁰, creusées au cœur de la couche d'argile. Les déchets de haute activité seront stockés dans des alvéoles de 150m de longueur et d'environ 70 cm de diamètre revêtus d'un chemisage métallique. Les déchets de moyenne activité à vie longue seront stockés dans des alvéoles de quelques centaines de mètres de longueur et d'une dizaine de mètres de diamètre. »⁶¹

Le processus est représenté visuellement en annexe 4.

Au total, 85 000 m³ de déchets devraient être stockés en sous-sol (75 000 m³ de MA-VL et 10 000 m³ de HA) avec 270 km de galeries creusées⁶². La période d'exploitation doit durer environ 125 ans, avec une fermeture prévue à 2150. L'impact radioactif en surface serait de 0,01 mSv/an⁶³. Pour donner un ordre de comparaison, la radioactivité naturelle moyenne (liée au radon présent dans le granit) en France est de 2,4 mSv/an. Du fait de l'exposition aux rayons cosmiques un vol Paris-Tokyo aller-retour expose le corps à 0,1 mSv, une année passée à 1500 mètres d'altitude à 0.6 mSv⁶⁴.

Lorsque la capacité totale de stockage sera atteinte, la fermeture du centre sera progressive, en commençant par les installations souterraines (alvéoles, galeries, puits et descenderie), et terminant par le scellement, le démantèlement des installations de surface et le remblaiement. Le planning du projet prévoit, comme pour les sites de stockage en surface (Centre de Stockage de la Manche, CIREs et Centre de Stockage de l'Aube), une période de surveillance après fermeture de Cigéo. Cette phase doit s'étendre sur une période de 5 siècles.

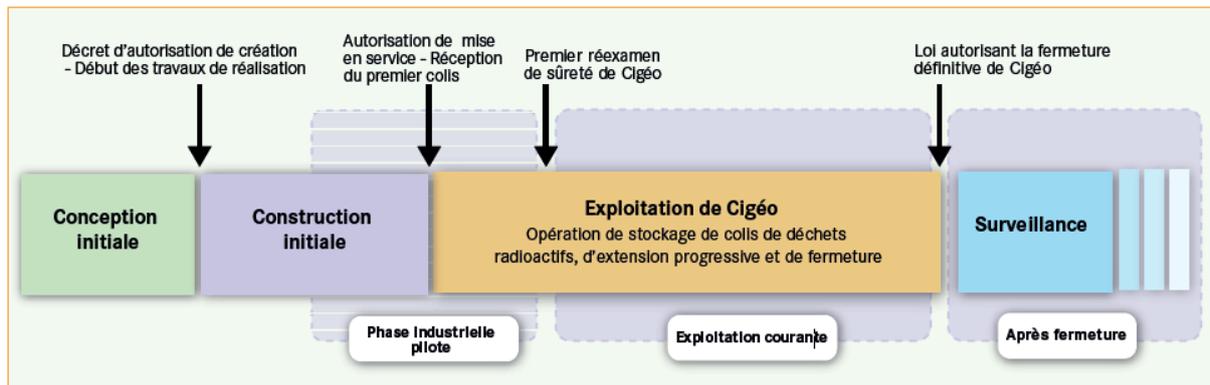


Figure 12. Planning (général) du projet Cigéo : les trois phases principales d'un projet pluriséculaire.
Source : Dossier *Note de positionnement sur la réversibilité*, Andra, Janvier 2016.

Par-delà les mesures prévues dans le projet d'enfouissement des déchets radioactifs, la volonté de l'Etat, du parlement et de l'Andra est de ne pas considérer le problème comme résolu d'avance. Une des problématiques de Cigéo dépassant l'ordre technique est celle de la mémoire. Cacher les déchets des yeux et des corps pour leur protection implique d'engager une transmission pluriséculaire afin que les générations futures n'oublient pas l'existence de ce lourd et dangereux héritage industriel.

⁶⁰ Voir annexe 3.3.

⁶¹ <https://www.andra.fr/cigeo/les-installations-et-le-fonctionnement-du-centre/les-installations-et-leur-localisation>

⁶² Cigeo.gouv.fr

⁶³ MilliSievert. Le sievert est une unité désignant une dose radioactive prenant en compte l'impact du rayonnement sur la matière vivante (Source : ASN).

⁶⁴ IRSN.fr

CHAPITRE IV. La mémoire du site à l'épreuve du temps : problématiques et état de l'art

IV.1. La mémoire au service de la sûreté

Le stockage en profondeur constitue une protection passive vis-à-vis de la radioactivité, considérée comme sûre (la protection) et pérenne par l'Andra : « *une intrusion inopinée à 500 mètres sous terre apparaît peu plausible, du moins sans un minimum d'investigations préalables à partir de la surface* »⁶⁵. Pour autant, les institutions chargées de la gestion et de la sûreté nucléaire (Autorité de Sûreté Nucléaire et Andra) considèrent qu'on ne peut raisonnablement se contenter de l'enfouissement des déchets sans assurer la mémoire de l'existence du site et des connaissances relatives au site.

La simple confrontation des échelles de temps entre la durée de vie des déchets radioactifs et les durées de vies relatives au corps biologique humain et aux structures sociétales permet de saisir que les activités productrices de tels déchets menés par les sociétés technologiques à partir du XX^{ème} siècle demandent le développement de moyens en vue de construire un héritage culturel robuste. Le constat indéniable qui en découle est qu'il nous est impossible de connaître les évolutions sociétales, culturelles et institutionnelles dans les siècles à venir, et qui plus est au-delà de 500 ans.

Les institutions et acteurs politiques concernées par la gestion des déchets et la mise en œuvre de Cigéo partent du postulat suivant : pour que la sûreté des installations (non pas sur le plan technique mais au sens le plus large) soit optimale, il faut pouvoir conserver la mémoire des sites. La préoccupation mémorielle est liée à la gestion des déchets radioactifs et notamment la question de la sûreté des sites depuis les années 1980 : en 1988, le « rapport Goguel » précisait « *La connaissance de l'existence du stockage devra être maintenue aussi longtemps que possible : conservation d'archives, délimitations visibles et durables du site* »⁶⁶. Cet aspect du projet a été formulé par L'Autorité de Sûreté Nucléaire le 1^{er} juin 1991, dont la règle de sûreté prévoit la « *conservation de la mémoire du stockage, permettant de rendre extrêmement peu probable l'intrusion humaine dans la zone du stockage* »⁶⁷.

Le choix d'une transmission de la mémoire est largement répandu chez les pays concernés par le stockage profond. Néanmoins le choix de l'oubli est également un parti pris défendu : la Finlande, pour son projet de stockage baptisé Onkalo⁶⁸, prévoit une fermeture définitive après remplissage. La sûreté d'une protection contre le danger des rayonnements reposerait sur la disparition de leur existence dans les esprits. Mais alors se pose la question d'une mémoire qui perdure malgré une volonté d'oubli. La transmission orale pouvant faire perdurer une forme de mémoire, il n'est pas exclu qu'une vision altérée de la nature du site et de ce qu'il renferme mène à des actions non désirées.

L'Andra donne trois raisons pour une transmission de la mémoire de tous les sites de stockage :

⁶⁵ 43^{ème} réunion du GT PNGMDR (Groupe de Travail : Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs), « Préservation de la mémoire pour les déchets de type HA-MAVL », en ligne : <https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/memoire-pour-43eme-reunion-du-gt-pngmdr-v03.pdf>

⁶⁶ *Rapport Goguel – Stockage des déchets radioactifs en formations géologiques. Critères techniques du choix de site*, Septembre 1988.

⁶⁷ ASN, *Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde*, Février 2008.

⁶⁸ Projet qui a donné naissance au film-documentaire *Into Eternity* de Michael Madsen.

- « **Ne pas oublier pour que les futurs scientifiques et responsables** puissent prendre les bonnes décisions (investigations, modifications ou retrait des colis...) selon les évolutions techniques et sociétales.
- **Ne pas oublier pour que les générations futures** puissent les surveiller.
- **Ne pas oublier pour éviter les intrusions**, volontaires ou accidentelles. »⁶⁹

La condition de la *mémoire*, telle qu'entendue dans le projet de transmission des savoirs autour des sites de stockage (qu'ils soient profond ou de surface), tient en la combinaison de trois paramètres – nommée « triptyque des solutions ». Les trois paramètres tiennent dans (i) les messages, (ii), les supports physiques utilisés, et (iii), les relais au service d'une préservation (de la mémoire, de l'information, des espaces, etc.). Les études menées en interne et via des partenariats s'inscrivent dans un programme de recherches pouvant s'étendre sur un siècle : le *programme Mémoire pour les générations futures*. Les différents axes, domaines de recherche, options, modalités, et solutions proposées sont menées de front, avec pour objectif une prise de recul suffisamment importante (et donc un temps de recherche, de consultations, d'échanges et d'expérimentations relativement long) avant toute prise de décision « définitive » quant aux marquages et messages utilisés. Cela n'exclue pas pour autant de mener, comme nous le verrons, des actions visant à favoriser la mémoire des sites et l'intérêt pour les lieux de stockage et la problématique des déchets radioactifs, par exemple à travers des projets artistiques.

La problématique mémorielle est par conséquent une question éminemment sémiotique. La constitution des messages implique de créer des discours signifiants et pertinents, non seulement pour nous, au début du XXI^e siècle, mais susceptibles de perdurer dans le temps. Quelles informations sélectionner ? Quelles formes doivent revêtir les discours ? De quelle nature doivent-ils être : linguistique, visuelle, auditive, audio-visuelle, plastique ? Quel rapport entre signifiant* et signifié⁷⁰ doit-on établir ? Les supports choisis contraindront la forme, et inversement. Les contenus choisis contraindront eux-mêmes les supports. Si ces derniers doivent porter les messages durablement, les études traitant des supports physiques orienteront probablement la nature des messages, ainsi que le mode d'accès à ces messages. Ce qui nous mène à la question de la transmission et des relais permettant de passer la mémoire de génération en génération. La source même des messages, leur signification, va conditionner la façon dont une société et ses parties s'approprient (ou non) la mémoire.

Nous voyons que la question mémorielle, souvent formulée comme une « conservation » de la mémoire des sites, relève d'abord de la création de cette mémoire à travers les discours conçus non seulement à destination des générations futures, mais à destination de notre propre société. En effet, la conscience à grande échelle des problématiques relatives aux déchets (ni même leur existence ou l'existence du projet d'enfouissement) n'est pas assurée.

De plus, la question de l'échelle de temps sur laquelle se projeter conditionnera certainement la façon dont nous aborderons les problématiques de communication. Les déchets radioactifs à vie longue pouvant avoir une durée allant jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années, sur quel terme se projeter pour envisager une transmission de la mémoire ? Parler de centaines de milliers d'années revient, à échelle humaine, à parler d'éternité. Une mémoire pour l'éternité est-elle raisonnablement envisageable ? Quels termes permettent de nous projeter dans le futur de telle manière que le sens pourra perdurer, qu'il réside en des

⁶⁹ Dossier de presse *Mémoire pour les générations futures. Préserver et transmettre la mémoire des déchets radioactifs*, Septembre 2014.

⁷⁰ Les termes marqués d'un astérisque sont définis dans le glossaire.

messages « figés » (des traces, témoignages de l'activité en sous-sol) ou bien évolutifs (par des rites et la traduction des contenus, par exemple) ?

Les questions que nous venons de formuler ne représentent qu'une fraction de la partie visible de l'iceberg, mais nous voyons déjà la nécessité de comprendre comment peuvent et doivent interagir les différents éléments qui constitueront le dispositif mémoriel.

L'exploration des pistes possibles, de natures diverses, pour répondre à la problématique d'une mémoire durable, est menée aussi bien au niveau national qu'international. La mise en commun des savoirs vient répondre aux questionnements partagés des pays concernés par la gestion des déchets radioactifs à vie longue, et fournit un cadre de réflexion fertile pour la mise en place d'un dispositif – nous parlerons plutôt d'un système – de conservation de la mémoire cohérent à travers les nations.

IV.2. Conservation et transmission de la mémoire : un projet international

Au plan international, des structures d'échanges ont été mises en place : les pays de l'OCDE ont créé l'AEN, Agence pour l'Energie Nucléaire, qui a pour but de générer une coopération scientifique, technologique et législative autour de l'exploitation de l'énergie nucléaire.

L'AEN a elle-même lancé le projet RK&M (pour Records, Knowledge and Memory⁷¹), qui incite les pays membres de l'OCDE à penser collectivement la mémoire des centres de stockage profond à travers le partage de résultats de recherches sur la mémoire, toutes disciplines y touchant, et des échanges sur les solutions les plus à même de perdurer et de générer des conceptions communes pour les marquages de sites.

Les principes fondamentaux dégagés par ce projet international fournissent une base pour la réflexion sur la construction d'une mémoire durable. Avant de les présenter, précisons la définition même des termes Documents, Connaissance et Mémoire (Records, Knowledge and Memory) afin de clarifier ce qui compose ladite « mémoire » dont nous parlons :

« **Archives, documents.** Des objets, des données ou des informations conservés sur un support pour un usage ultérieur, accompagnés du contexte et de la structure appropriées.

Connaissance. La capacité à comprendre et faire usage des données, des informations et des documents disponibles.

Mémoire. La conscience d'événements, de personnes, de lieux et de niveaux de connaissance du passé. »⁷²

À terme, les découvertes menées et regroupées dans le cadre de la mise en commun au sein du projet doivent donner naissance à une approche ou solution systémique envisageant les différentes sphères, différents domaines et acteurs et leurs interactions pour mettre en place un réseau informationnel durable. Cette solution porte le nom de *RK&M system*, ou système DCM en français.

⁷¹ Dans sa version longue, Preservation of Records, Knowledge and Memory Across Generations. Les structures nationales de gestion des déchets radioactifs membres du projet engagent les pays suivants : France, USA, Allemagne, Espagne, Japon, Suisse, Royaume-Uni, Canada, Belgique, Hongrie, République Tchèque, Suède et Finlande.

⁷² RK&M Collective Statement 2011 [traduction française].

IV.2.1. Les échelles de temps et la surveillance

L'AEN a défini trois périodes de référence pour situer le terme auquel il est possible de se projeter lorsque l'on aborde la question de la mémoire des centres de stockage. Ces trois périodes sont liées et définies à partir du concept d'*Oversight*. Oversight peut être traduit par « surveillance », l'acception donnée par l'AEN est spécifique à la gestion des déchets radioactifs à vie longue : un « *terme général pour "attention vigilante" et qui réfère à une "société gardant un œil" sur le système technique et la réalisation concrète des plans et décisions* », qui comprend à la fois la « *supervision et la régulation, les contrôles institutionnels, la préservation des archives sociétales, et la conservation mémorielle de la présence des installations* »⁷³. Le principe de surveillance implique une activité, une observation et une présence actives pour conserver la mémoire et la « maintenir en vie ». Bien que la mémoire ne se réduise pas à la surveillance (elle est un prérequis à la surveillance), cette dernière travaille activement pour la mémoire et en complémentarité avec une mémoire collective.

L'Oversight est projeté sur le planning général (tel que donné en figure 12), et corrélé à trois périodes différentes de projection temporelle (figure 13, ci-dessous) :

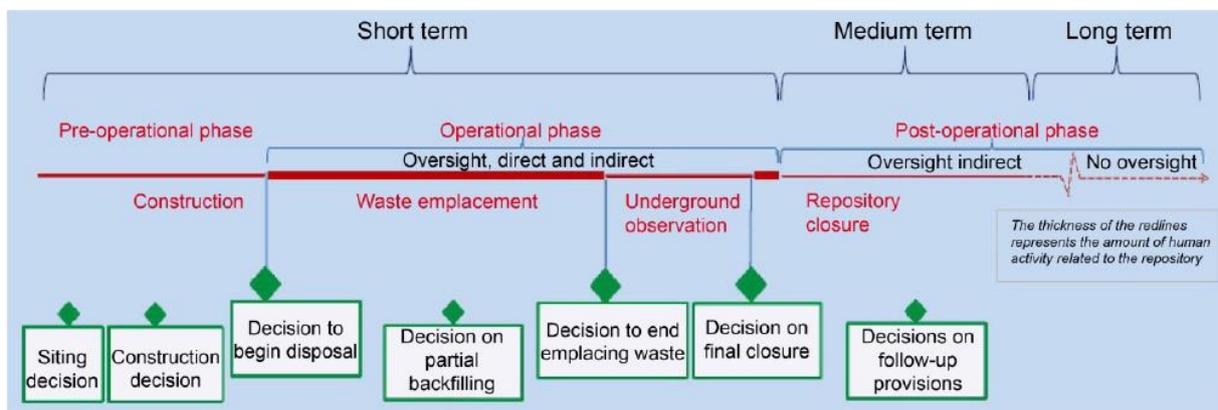


Figure 13. « Phases de stockage et exemples de décisions associées »

Source : *Constructing Memory Conference* (2015).

Sur la frise ci-dessus, la surveillance humaine connaît trois différents niveaux ou formes : directe, indirecte, et inexistante. La surveillance directe (*direct oversight*) correspond au temps où les déchets sont accessibles, la surveillance indirecte (*indirect oversight*) à la période où ils ne sont plus facilement accessibles, c'est-à-dire après le scellement des accès (on entre ainsi dans une période d'« observation ») des dépôts. Cette surveillance indirecte se prolonge après la fermeture du centre (*post-operational phase*) jusqu'à la disparition de la surveillance (*no oversight*), quelques siècles après la fermeture.

Les trois périodes avancées par l'AEN sont donc le court-terme, le moyen terme et le long terme (*short term*, *medium term* et *long term*), comme représentés ci-dessus. La phase de

⁷³ Notre traduction ; « *Oversight is a general term for "watchful care" and refers to society "keeping an eye" on the technical system and the actual implementation of plans and decisions Oversight is always by people and has a different, partly broader focus than control. Oversight includes regulatory supervision (such as control and inspection), institutional control (e.g. monitoring), preservation of societal records (such as archiving) and societal memory keeping of the presence of the facility* », HOTZEL S., « The concept of oversight, its connection to memory keeping and its relevance for the medium term : The findings of the RK&M initiative », NEA, RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT AND CONSTRUCTING MEMORY FOR FUTURE GENERATIONS, *Constructing Memory Conference, Proceedings of the International Conference and Debate*, Verdun, France, No. 7259, 15-17 September 2015, p.65.

surveillance indirecte commence avant la fin du court terme, compose l'entièreté du moyen terme, et le long terme comprend la disparition de la surveillance.

- Le *court terme* prend fin avec la fermeture du centre, et s'applique sur une période d'au moins 100 ans.
- Le *moyen terme* correspond à une période de « quelques milliers d'années », l'AEN précisant qu'il est difficile d'être catégorique sur la durée exacte de cette période et de la fin de la surveillance.
- Le *long terme* concerne la période durant laquelle les régulations de sécurité ne feront plus partie des préoccupations (*concern*), très certainement dans les dizaines de milliers voire centaines de milliers d'années qui suivront la fermeture.

Les recherches et réflexions de l'Andra se fondent également sur ce découpage de la projection temporelle proposé par l'AEN. Pour Cigéo, la période de surveillance (*indirect oversight*, dans les termes de l'AEN), doit se prolonger pendant au moins 5 siècles avec présence humaine sur le site. Les institutions concernées insistent par ailleurs sur le fait que la disparition de la surveillance n'est pas le fait d'un renoncement mais d'une projection réaliste d'une perte d'intérêt pour un site : « le retrait de la surveillance ne doit pas être planifié mais la planification doit prendre en compte la perte potentielle de cette surveillance »⁷⁴. Ainsi, le projet RK&M suggère deux voies de planification, l'une conservant la surveillance, et l'autre où la surveillance est perdue, « *idéalement, [...] les efforts devraient être poursuivis pour assurer le fait que la société s'inscrive le plus longtemps possible dans une situation de surveillance propre au moyen-terme* »⁷⁵.

La notion de *contrôle* est liée à celle de surveillance, et de fait s'applique différemment en fonction des périodes projetées :

- Sur le court terme, la surveillance directe est assimilée au contrôle par réglementations en vigueur dans le courant de l'exploitation.
- Sur le long terme, aucun contrôle d'origine humaine ou institutionnelle ne peut être exercé. Il peut l'être en revanche par le biais des protections, de la roche hôte, ou tout composant non animé constituant la protection structurelle du site. Ce contrôle est nommé « contrôle intrinsèque » (*intrinsic control*).
- Sur le moyen terme, le contrôle intrinsèque et la surveillance vont de pair. Le niveau de sûreté offert par les éléments de sécurité passive serait ainsi complété par la surveillance qui aurait pour rôle de réduire les risques d'exposition.

La surveillance sur le moyen terme pourrait se traduire par une présence humaine sur le site avec relevés fréquents pour contrôle de la qualité de l'air et de l'eau, pour observation de l'évolution des structures de sécurité, et maintenance (si possible) des installations éventuelles. Les servitudes, l'encadrement légal et les contrôles de visite du site pourraient également être poursuivis (ce qui est prévu dans le cas de Cigéo). Ainsi les mesures de surveillances proposées dans le cadre de l'initiative RK&M sont les suivantes⁷⁶ :

- Le contrôle de l'occupation des terrains (encadrement administratifs, légaux, interdictions).
- La préservation des documents (gestion des archives : nationales ou dédiées au site).

⁷⁴ Notre traduction ; « *With regard to RK&M preservation this means that removal of oversight is not to be planned for, but planning must be made for potential loss of oversight* », *Idem*.

⁷⁵ *Idem*.

⁷⁶ *Idem*.

- La conservation de la mémoire sociétale sur le site, par des actions locales et nationales, par des moyens physiques ou sociétaux.
- Des états des lieux réguliers des mesures en place, et inspections régulières.
- Des remises de rapports régulières auprès d'entités publiques (IEAE, Conseil de l'Union Européenne).

La notion de *responsabilité* est également envisagée par l'AEN dans l'initiative RK&M. D'après elle, la responsabilité du maintien de la surveillance doit être le fait de la société au sens large. Les échanges entre les différentes institutions et acteurs nationaux et locaux, qu'ils soient d'ordre politiques, scientifiques, culturels, associatifs ou tout autre, sont vivement recommandés au vu d'observations et de recherches permettant à l'AEN d'affirmer que le manque d'action humaine, d'encadrement et de régulations favorisent la perte des archives, de la connaissance et de la mémoire (Records, Knowledge and Memory).

IV.2.2. Des moyens en vue d'une mémoire durable

Le projet international préconise une double approche de la transmission mémorielle (*dual-track strategy*) : l'une médiée (les messages sont transmis de génération en génération), et l'autre non-médiée (les messages sont délivrés sous une forme figée à partir d'un « présent » en direction d'un « futur »⁷⁷). Ces deux conceptions de la transmission doivent être complémentaires. La première phase des recherches a montré qu'il n'existe aucune solution efficace qui puisse se fonder sur un support, média, ou moyen unique. Il est donc préconisé de construire un dispositif mémoriel qui fasse système, et dont les divers éléments le composant se complètent et établissent des références mutuelles.

Parmi les thématiques de travail priorisées, lesquelles correspondent à autant de moyens de constituer une mémoire durable, l'AEN liste les champs suivants.

L'*archivage des documents* : l'initiative RK&M veut mettre en place une vue d'ensemble des expériences propres aux archives nationales des pays membres, et de leur possible contribution au projet en envisageant des solutions archivistiques fondées sur les problématiques rencontrées par les spécialistes de la conservation.

La *sélection des documents* et l'*articulation des formats* a vu la proposition d'un modèle d'information à trois niveaux, Ce modèle suggère une partition des documents en fonction de la précision des informations, de leur quantité, de la longueur du document explicatif et du public visé. Une représentation de cette articulation est donnée en figure 14 :

⁷⁷ Les guillemets viennent exprimer la précaution dans l'utilisation de ces termes, puisqu'on ne peut exactement exprimer à quel moment seraient émis ces messages, et donc de quel présent nous parlons (le présent *présent*, ou bien le présent du futur ?)

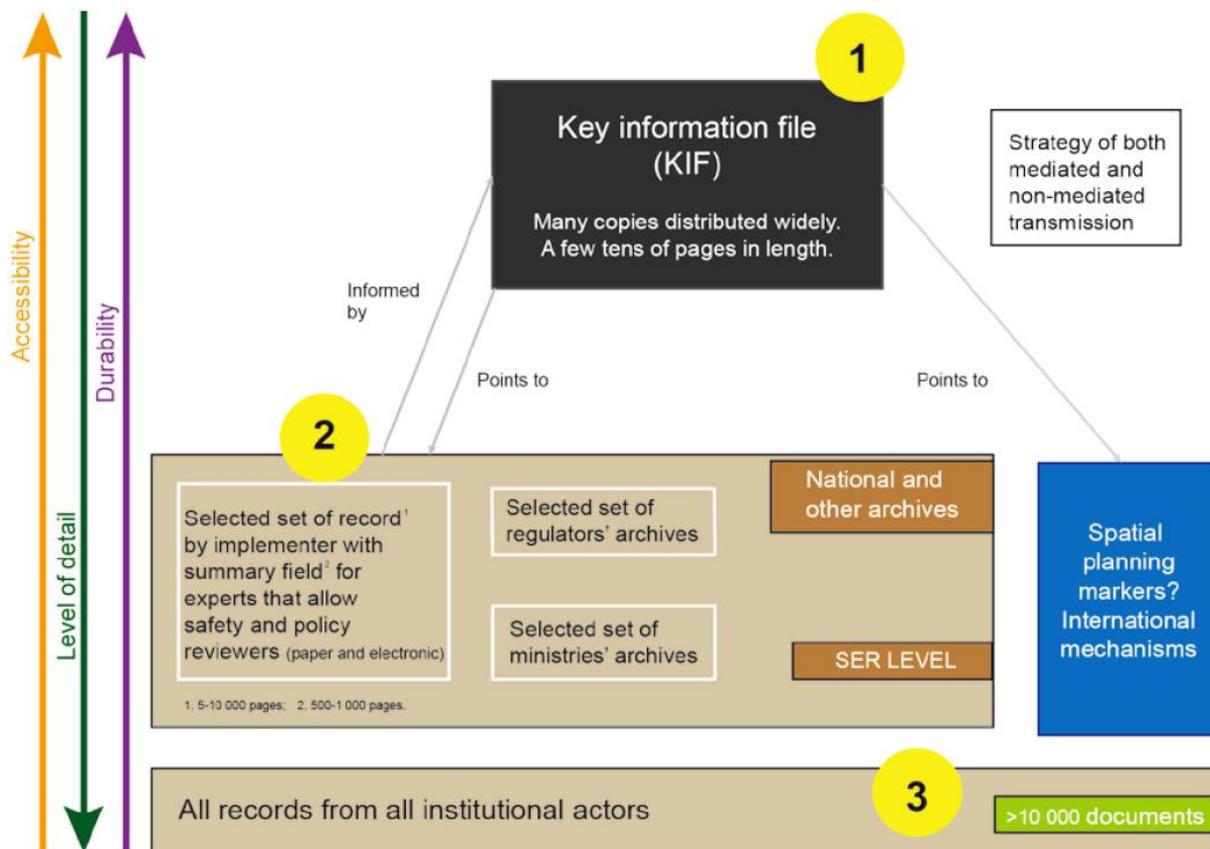


Figure 14. « Systémisation des informations sur le stockage en trois niveaux »
 Source : *Constructing Memory Conference* (2015)

Les trois niveaux de documentation disposent d'une longueur propre. Le niveau 3 est constitué de la totalité des documents composant des informations sur le site, sa longueur dépasse les 10 000 documents. Étant techniquement très descriptif, complexe, varié et figé dans des expressions linguistiques propres à son temps, son espérance de durabilité est bas. Le niveau 2 est celui du SER, soit *Set of Essential Records*, qui regroupe les informations les plus importantes à propos du site et de l'organisation des structures et du stockage. Sa longueur varie entre 5 000 et 10 000 pages, avec un document additionnel comprenant des informations à destination d'experts de 500 à 1000 pages. Enfin, le *Key Information File* (KIF) constitue le niveau 3 ; il s'agit d'un résumé des informations essentielles comprises dans les documents des deux précédents niveaux, rédigé dans un format et un langage qui le rende accessible à toute personne non-spécialiste. Nous reviendrons sur cette déclinaison à travers l'exemple du centre de stockage de la Manche (CSM).

Les *mécanismes internationaux* : l'idée est de renforcer les échanges entre nations concernées par la problématique du stockage des déchets à vie longue et de sa mémoire, notamment en ancrant ceux-ci dans des encadrements politiques communs. Il s'agit là d'avoir une vue critique sur les interactions intergouvernementales et internationales non-gouvernementales, en vue d'en faciliter les mécanismes et la fluidité des échanges.

À l'instar des mesures engagées par l'Andra et le parlement français, la question du transfert des responsabilités revêt une grande importance. En effet, les enseignements tirés de études déjà menées au sein du projet RK&M indiquent que les communautés locales jouent un rôle majeur dans la question de la durabilité des activités et des observations d'un site. De plus, le moment du transfert et du changement des responsabilités est celui où se perdent souvent

des quantités importantes d'informations. Il s'agit alors d'envisager un tissu sociétal et structurel suffisamment lié et inscrit dans la problématique pour assurer des transferts optimaux.

Enfin, les *marqueurs* : dans l'acception de l'AEN, un marqueur est un « *objet durable qui indique une zone d'influence, de pouvoir ou de danger. Il est placé stratégiquement sur ou à proximité du site en vue de la reconnaissance immédiate ou de sa découverte dans le futur* »⁷⁸. Toujours d'après l'AEN, les marqueurs font partie d'un mode d'information non médié. Ils peuvent être en surface ou placés dans la terre dans le but d'indiquer une activité passée. Ils sont aussi liés à la question de l'héritage culturel, considérant qu'ils seront plus à même de perdurer s'ils sont inclus dans la mémoire et les pratiques sociétales.

Les suggestions initiales du projet RK&M concernant les marqueurs évoquaient des marqueurs durables, immobiles, immuables. De plus, ceux-ci ne pouvaient être conçus indépendamment du système : ils devaient faire référence aux autres éléments du système de conservation de la mémoire (système RK&M/système DCM). Les études menées ont dévoilé la fragilité de marqueurs immuables et inchangés. En effet, une étude⁷⁹ a été menée sur le cas de pierres érigées au Japon dont la fonction était de marquer une zone à risque liée aux tsunamis (*tsunami stones*). 317 pierres placées le long de la côte nord-est du Japon depuis 1896⁸⁰ contenaient des messages portant sur les tsunamis, pour marquer l'histoire de leur passage et exprimer la nécessité de se protéger d'une catastrophe en évitant de construire des habitations dans la zone qu'elles couvrent – les tsunamis frappent le Japon avec une certaine régularité à travers les décennies et les siècles. La durabilité physique de ces marqueurs a été relevée, ainsi que leur efficacité, dans certains cas, à inscrire le sens voulu dans la culture. Néanmoins l'efficacité en tant qu'avertisseur est remise en question. Si dans certains lieux l'avertissement et le conseil étaient respectés par les habitants locaux, plusieurs cas de non-respect des consignes ont été relevés, soit parce que les personnes ignoraient l'existence des messages, soit parce qu'ils ignoraient délibérément les consignes. Plusieurs raisons l'expliquent : « *la non-connaissance ou la mécompréhension des messages, mais surtout le remplacement par des systèmes d'avertissement plus modernes, le déchargement des responsabilités sur les autorités, et la poursuite d'intérêts économiques à court terme* »⁸¹.

L'AEN en a conclu que, même si les marqueurs font partie d'une communication non-médiée, leur durabilité est fortement liée à l'attention portée au site et à sa mémoire, par conséquent à la surveillance ; « *la société a sans doute un rôle important à jouer dans la longévité des messages compréhensibles* »⁸². Plus encore, les marqueurs pourraient faire partie d'une stratégie de renforcement des liens culturels entre le site de stockage et les communautés vivant à proximité. Leurs fonctions pourraient varier : « *Ils peuvent être inclus dans des*

⁷⁸ Notre traduction ; « *long-lasting object that indicates an area of influence, power or danger. It is placed strategically at or near the site for immediate recognition or for discovery at a later time* » ; AEN, « Glossary of Terms : Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) across Generations », OECD, Paris, 2014. En ligne :

www.oecd-nea.org/rwm/docs/2011/rwm2011-14-rev4.pdf.

⁷⁹ AEN / RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT , *Markers – Reflections on Intergenerational Warnings in the Form of Japanese Tsunami Stones*, Mai 2014.

⁸⁰ Certaines remontaient cependant à des époques bien antérieures, jusqu'à un millénaire.

⁸¹ Notre traduction, *Constructing Memory Conference, op.cit.*, p.87.

⁸² *Idem*.

processus de médiation et de régénération de la mémoire, assurer des fonctions de limitation de la zone, une fonction rituelle, et/ou être conçus eux-mêmes comme des objets médiés »⁸³.

Concernant le rapport au système, il a été avancé qu'un marquage faisant système par lui-même, c'est-à-dire par l'interaction et la redondance entre les éléments de marquage serait plus efficace. Ce système de marquage serait alors conçu pour susciter la curiosité et le désir d'en apprendre plus sur ces installations et sur le site.

Les actions et recherches de l'Andra en France s'inscrivent dans les objectifs de l'initiative RK&M, et nourrissent même les connaissances et expériences du fait de l'avancée de la France dans ces domaines. Le cas du dispositif mis en place dans le centre de la Manche, notamment, illustre l'articulation prévue pour une mémoire durable.

IV.3. Dispositif et recherches de l'Andra pour la mémoire

IV.3.1. Dispositif en place dans les centres existants

Sur la base de l'expérience fournie par les centres de stockage en surface, notamment le centre de la Manche (CSM, le plus ancien, actuellement en phase de fermeture), l'Andra a développé un dispositif favorisant une mémoire des sites mêlant supports, archives, et lien avec les acteurs de la sphère locale. Ce qu'elle nomme « solution de référence » se décline en plusieurs dispositifs :

« Trois dispositifs archivistiques « passifs » imprimés sur du papier permanent⁸⁴ :

- *Une "mémoire détaillée pour fournir les connaissances pour comprendre, corriger ou transformer le centre de stockage (plus de 700 boîtes d'archives sur la Manche)".*
- *Une "mémoire de synthèse pour informer le public et les décideurs de l'existence et du contenu du site (pour la Manche, document de 169 pages en 2008 sur Internet)".*
- *Des "servitudes d'utilité publique pour limiter l'usage futur du site via un arrêté ministériel".*

Deux dispositifs mémoriels "actifs" pour valoriser ces archives auprès des publics :

- *Communication libre de l'Andra*
- *Communication avec les institutions (ASN, PNGMDR, et CLI⁸⁵ notamment)*

Une évaluation décennale externe de ces dispositifs (première évaluation en 2012). »⁸⁶

Le choix de l'Andra pour un dispositif au service de la mémoire se fonde sur une déclinaison des informations en deux niveaux, l'un consistant en une synthèse accessible à tous, c'est-à-dire comprenant les informations essentielles sur le site, et compréhensibles pour un néophyte, et l'autre en une description technique détaillée du centre. Dans le centre de la Manche, plus de 11 000 documents composent la mémoire détaillée et environ 100 pour la mémoire de synthèse⁸⁷. Cette dernière est conservée en différents lieux : site de stockage, mairies, associations, archives nationales.

⁸³ *Idem.*

⁸⁴ Nous y reviendrons.

⁸⁵ *Idem.*

⁸⁶ 43^{ème} réunion du GT PNGMDR (Groupe de Travail : Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs), « Préservation de la mémoire pour les déchets de type HA-MAVL », en ligne : <https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/memoire-pour-43eme-reunion-du-gt-pngmdr-v03.pdf>

⁸⁷ Andra.fr.

Ces deux premiers documents doivent être complétés d'une « mémoire simplifiée » de 30 pages, ainsi que d'une « mémoire d'ultra synthèse » tenant en une page recto/verso, et diffusée très largement (écoles et grand public). En ce sens, le dispositif se rapproche de la proposition RK&M avec les trois niveaux de documentation.

Nous retrouvons là une composition de la conservation de la mémoire selon l'opposition actif vs passif, qui correspond à la transmission médiée et non-médiée évoquée plus haut. La part non médiée est composée d'une déclinaison en documents exhaustifs et synthétiques, lesquels sont archivés sur site et hors site (archives nationales), ainsi que d'un encadrement légal (servitudes), qui délimite la zone et anticipe toute intrusion ou altération dangereuse du site.

La partie plus axée sur la communication (médiée) se fonde sur des espaces d'échange et d'information : l'Andra et l'ASN constituent deux sources d'information. Les CLI, Commissions Locales d'Information, sont des groupes constitués de divers acteurs de la société civile : politiques, syndicats, associations, citoyens individuels.

La *solution de référence* est jugée robuste par l'Andra et l'Autorité de Sûreté Nucléaire pour une mémoire sur plusieurs siècles, c'est-à-dire entre 500 ans et un millénaire – ce qui correspond aux estimations de durée du « moyen-terme ».

À cela s'ajoute la mise en place de *groupes mémoires*, des groupes constitués de riverains, d'acteurs politiques, associatifs, culturels locaux, et dont l'objectif est de contribuer activement à la réflexion et au développement d'une mémoire durable pour les sites. La communication est ainsi à prendre au sens premier : il y a une interaction entre l'Andra, les institutions porteuses du projet d'enfouissement, les citoyens, et autres acteurs de la société.

Un dispositif similaire est prévu pour Cigéo, les CLI et groupes mémoires existant déjà pour engager les échanges et la construction de la mémoire au plus tôt. Évidemment, la « solution de référence » n'est pas une réponse suffisante pour les échelles du stockage profond, sachant que l'on vise une période de surveillance la plus durable possible. De nombreux domaines d'étude sont encore en cours d'exploration et contribueront au fil des décennies à mettre un place un système redondant, cohérent et optimal pour créer et porter la mémoire.

IV.3.2. Les champs de recherche en France

En France, l'Andra développe ses actions et recherches couvrant des champs variés.

IV.3.2.1. Les supports

L'Andra travaille au développement des archives et à l'application de la déclinaison des documents au stockage en profondeur. Pour Cigéo, elle envisage l'implantation d'une délégation des Archives de France, ouverte au public, et faisant partie d'un « centre de la mémoire ».

Parler d'archivage implique de savoir sur quels supports inscrire les informations qui seront conservées. L'instabilité des supports technologiques actuels est évidente si l'on observe la rapidité avec laquelle chaque support est remplacé par un nouveau. Depuis le milieu du XXème siècle, les technologies analogiques, électro-magnétiques et numériques se sont succédé à un rythme extrêmement soutenu. Si bien que lire une cassette VHS des années 1990 est aujourd'hui très difficile, à moins que l'on ne dispose d'un magnétoscope en état de marche quelque part dans un débarras ou au grenier (encore faut-il posséder un écran ou une télévision qui dispose d'une entrée « Péritel » de type Euroconector).

L'Andra a donc priorisé l'impression papier pour l'inscription de messages linguistiques, associée à des versions numériques, pour une conservation certes encombrante, mais plus durable. Les documents composant la « solution de référence » sont ainsi imprimés sur un papier nommé « papier permanent ». Constitué de pure cellulose, ce papier dispose d'une meilleure résistance à l'oxydation et à la déchirure. La nature de l'encre utilisée, associée à ce papier assure une stabilité du support sur plusieurs siècles (contre quelques décennies pour un papier classique), dans des conditions de conservation adaptées.

Une autre production a vu le jour dans ce cadre de recherche : un disque de saphir synthétique permettant d'inscrire l'équivalent de 40 000 pages, et dont la durée de vie peut dépasser le million d'années (bien sûr, dans des conditions appropriées). Mais un problème subsiste pour ce type de solutions : la pérennité des langues et des symboles. Sans connaissance de l'évolution sociétale et technologique future, la durabilité d'un tel support reste limitée malgré sa résistance physique.

L'archéologie des paysages, associée à la géologie et la géomorphologie, constitue un des pans de recherches effectuées sur les supports. Ce pan anticipe l'hypothèse de l'oubli – l'échelle est donc celle du long-terme – en considérant les traces laissées par l'activité humaine sur le site, ou comment les vestiges du site d'enfouissement évolueront et seront visibles (ou non) après des changements dus à l'érosion sur 1000 ans ou plusieurs centaines de milliers d'années. Par ailleurs, inspirée par les découvertes archéologiques successives que le temps et les évolutions géologiques autorisent, l'Andra étudie également « *la pertinence d'un marquage archéologie du site par dispersion d'artefacts* »⁸⁸ :

*« Il s'agirait de déposer volontairement de petits objets sans valeur (pour éviter leur pillage) mais particulièrement durables, disposés de manière à attirer l'attention sur la singularité du site, et porteurs d'un message simple indiquant un danger en sous-sol : de petits disques de céramique par exemple. L'Andra a débuté en 2011 une étude visant à estimer la faisabilité de ce marquage, notamment sur sa détectabilité au fil du temps. »*⁸⁹

IV.3.2.2. Les relais

Nous avons abordé les relais en filigrane : s'appuyant sur des résultats d'études, l'Andra a débuté la mise en place d'une communication active incluant les habitants et acteurs locaux proches des sites de stockage de sorte à favoriser le processus de transmission.

Par ailleurs, l'archivistique porte également sur la pérennité des relais : une vaste étude a été lancée pour identifier les conservateurs institutionnels les plus pérennes. Elle cherche ainsi à savoir quel type de structure a pu faire preuve d'une robustesse et d'une durabilité dans la conservation et la transmission des documents et des savoirs :

*« La première étape de ces travaux de recherche a permis de dresser un tableau des causes et des conséquences des pertes d'archives, ou à l'inverse de leur "résilience". Une deuxième étape vise à comprendre les mécanismes de la robustesse (ou non) des dispositifs archivistiques face au temps... avec en ligne de mire, la définition du meilleur dispositif d'archive pour l'Andra. »*⁹⁰

⁸⁸ ANDRA, Dossier de presse *Mémoire pour les générations futures. Préserver et transmettre la mémoire des déchets radioactifs*, Septembre 2014.

⁸⁹ *Idem.*

⁹⁰ *Idem.*

Enfin, l'art est perçu comme une voie possible pour favoriser la création d'une mémoire et assurer un relai culturel. À l'international, des propositions ont déjà été faites, en particulier sur des habillages artistiques d'installations de stockage pour le court terme. Comme le dit Hans Codée, directeur des installations de stockage des déchets radioactifs au Pays-Bas, « les histoires font la mémoire », et l'art est un terrain fertile pour la narration d'histoires, à l'instar des récits d'Homère encore lus et étudiés aujourd'hui⁹¹. Pour lui, « *le monde scientifique strictement rationnel et le monde émotionnel de l'art doivent ne faire qu'un* »⁹². L'art est vu comme un moyen majeur de susciter l'intérêt des citoyens pour la problématique des déchets à vie longue : il incite à se questionner, à réfléchir à la portée d'une œuvre, à laisser le sensible être une source d'informations. Sous diverses formes, et par des médiations variées (communications, œuvre cinématographiques, expositions, résidences, conférences, conception du marquage de site, etc.), il est aussi bien un moyen de créer la mémoire que de favoriser sa transmission de génération en génération. Par exemple, l'art pourrait être un biais pour l'introduction de pratiques rituelles, rythmant ainsi la transmission à des intervalles réguliers, et l'incluant dans une symbolique qui dépasse la vision techniciste des déchets radioactifs.

Plusieurs possibilités sont envisagées pour inclure les artistes et les œuvres au programme mémoire : « *placer progressivement des objets marquants autour du site* », pour « *interpeller les visiteurs* », « *poser des stèles* » pour la « *solennité et la mise en scène* », ou encore « *installer une œuvre d'art de grande taille* »⁹³.

Dans l'immédiat, la création artistique est encouragée par des résidences d'artistes à l'image de la collaboration avec Cécile Massart, qui dédie son œuvre plastique à la transmission de la mémoire. A ce jour, l'Andra a lancé trois appels à projets artistiques, en 2015, 2016 et 2018, avec remise de prix pour inciter à la réflexion, aux échanges et à la proposition d'idées innovantes autour du marquage de site pour construire une mémoire pérenne. En 2019, l'Andra a en outre lancé la résidence "Prospectives graphiques" en partenariat avec le Signe, le Centre national du graphisme, à Chaumont (Haute-Marne). Les deux lauréats ont réfléchi ensemble sur le thème d'une signalétique pérenne de la dangerosité des déchets radioactifs.

IV.3.2.3. Les messages

Nous avons gardé la question des messages pour la fin de ce chapitre car elle nous concerne particulièrement. La question des messages est centrale en ce qui concerne les préoccupations de la sémiotique. Un projet de recherche a été lancé en 2014 entre le Centre de Recherches Sémiotiques de Limoges (CeReS) et l'Andra. Il impulse des études en linguistique et sémiotique couvrant plusieurs champs, dans le but d'établir une mémoire sur le long terme. C'est dans le cadre de ce contrat que les présents travaux ont été menés.

La question principale qui guide les recherches est bien celle qui cherche à comprendre et identifier comment le sens pourrait perdurer. Le sens est ce qui permettra aux générations futures d'adopter des comportements appropriés vis-à-vis du stockage profond. Il est ce qui fonde une transmission intergénérationnelle : ce qui fait sens doit perdurer. Mais ce n'est pas

⁹¹ CODÉE H., « What's the story? Using art, stories and cultural heritage to preserve knowledge and memory », NEA, RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT AND CONSTRUCTING MEMORY FOR FUTURE GENERATIONS, *Constructing Memory Conference, Proceedings of the International Conference and Debate, Verdun, France, No. 7259, 15-17 September 2015*, pp.53-56.

⁹² *Idem.*

⁹³ ANDRA, *Mémoire pour les générations futures. Préserver et transmettre la mémoire des déchets radioactifs*, op.cit.

pour autant que le sens originel perdure. Nombreux sont les exemples de découvertes archéologiques nous fournissant des informations sur les cultures et civilisations passées. Leurs modes de vie, leur nourriture, leur niveau de richesse, peut-être même leur organisation hiérarchique peuvent être déduits des observations faites sur les sites, liées parfois aux traces laissées par quelque auteur, stratège, historien ou « administratif ». Mais l'observation des artefacts ne permet que très difficilement, voire ne permet pas du tout d'en saisir le sens.

Les vestiges des peuples scandinaves de l'âge du bronze et de l'âge « viking » nous permettent d'observer une organisation sociale, la valeur accordée à une fonction sociale (guerrier, garde, dirigeant, etc.), l'importance de la spiritualité par exemple. Mais le sens du placement d'objet dans des sépultures, le sens derrière une divinité qui nous est parvenu grâce à des auteurs catholiques de la fin du XI^{ème} siècle ou du XII^{ème} siècle se dévoilent toujours dans une opacité quasi-impénétrable du fait de l'évolution des récits, de leurs récupérations et du manque de sources fiables.

Autre exemple, au hasard, celui du site de Tintignac en Corrèze où des artefacts Gaulois sont retrouvés sous les vestiges d'un site gallo-romain : des casques aux formes atypiques inspirées de créatures diverses sont considérés comme une découverte rare et de grande valeur, mais qu'en est-il de leur usage ? Leur forme ne permettrait pas une utilisation militaire, mais est-ce à dire qu'ils étaient utilisés dans des rituels religieux ? Les usages rituels sont souvent une raison avancée lorsqu'il est difficile de saisir le sens d'un objet. Force est de constater notre manque de savoirs quant aux sens placés dans des objets aussi anciens. Un carynx, sorte d'instrument à vent très allongé également retrouvé sur le site, a probablement été utilisé sur les champs de bataille pour effrayer les ennemis grâce au son étrange qui s'en échappe. Mais qu'en sait-on réellement ? Notre interprétation du son comme une chose effrayante ne biaise-t-elle pas la lecture ? Qu'en est-il de la symbolique animale investie dans ces objets de grande valeur ? Le défi principal, plus que de trouver des supports durables, est bien celui de la conservation du sens⁹⁴.

Eleni Mitropoulou synthétise les principaux enseignements des recherches dans les actes de la *Constructing Memory Conference*⁹⁵. La consultation de la littérature a d'abord mis en avant le manque de recul vis-à-vis d'une expérience « historique » de la communication (ici de la communication envers un public large), et d'autant plus en ce qui concerne les marqueurs⁹⁶. Un travail bibliographique a permis d'observer le manque de connaissances approfondies permettant d'envisager une mémoire à long terme (les seuls travaux allant dans ce sens étant ceux proposés par Sebeok et la Human Interference Task Force pour les Etats-Unis). C'est dans ce cadre qu'a été avancée la nécessité de rendre durable non pas les marqueurs mais plutôt le processus de communication, soit d'établir un système au sein duquel chaque élément est en interdépendance avec les autres. Le site et sa mémoire doivent donc être conçus comme un discours composé de sous-discours, soit « un site qui s'énonce »⁹⁷. En tant que discours, l'énonciation du site serait donc vivante. Et pour être un discours vivant, la

⁹⁴ Ces objets, enterrés sous le sanctuaire d'origine, ont été délibérément cachés et conservés sous terre, supposément pour éviter leur perte ou destruction à l'aube de l'implantation romaine dans les terres Lémovices.

⁹⁵ MITROPOULOU E., « Defining a communication system for the long term », NEA, RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT AND CONSTRUCTING MEMORY FOR FUTURE GENERATIONS, *Constructing Memory Conference, Proceedings of the International Conference and Debate*, Verdun, France, No. 7259, 15-17 September 2015, pp.93-97.

⁹⁶ *Idem*.

⁹⁷ *Idem*.

communication doit être associée à l'activité humaine. En ce sens, une expertise de la communication actuelle et des préconisations ont été émises en vue de construire progressivement des discours cohérents et qui s'agencent au sein d'un discours général, celui du site d'enfouissement et de sa mémoire.

Les premières études linguistiques ont montré qu'un système de communication universel (une langue, par exemple) n'est pas efficace à long terme. La durée de vie d'une langue étant d'environ un millénaire (avec des variations potentiellement très fortes à travers les siècles) en fait une option peu viable, même si elle fait l'objet d'une codification par un organisme. Par ailleurs, une langue doit évoluer au sein d'une culture pour être vivante, il semble donc difficile de s'affranchir de l'ancrage et des évolutions culturelles. De plus, l'écriture a été avancée comme étant une forme susceptible d'assurer une transmission.

Les notions d'information et d'avertissement ont été questionnées à travers des analyses linguistiques et en vue d'envisager l'articulation possible de modalités informatives (informer, avertir, alerter) au sein d'un marquage de site.

Le discours du site doit être « multidimensionnel », c'est-à-dire construit par des messages et supports de différentes natures, et faisant appel à des modalités langagières et sensorielles variées⁹⁸. C'est pourquoi des recherches sur les pictogrammes ont été menées en vue d'identifier s'il était possible d'exprimer, à travers la représentation graphique, des formes et des contenus compréhensibles à échelle universelle. Car même si un langage universel n'est pas une base suffisante, rien ne semble empêcher de tendre vers des formes de l'universalité. Ces formes ne pouvant qu'être assurées dans leur interprétation par la cohérence du système de communication et/ou du système de marquage de site, et dans leur rapport entre expression* et contenu*⁹⁹ par la culture qui les intègre.

Le son a donc été proposé comme une piste d'exploration pour contribuer à la construction d'une mémoire et au marquage de site. L'objectif général de ce travail étant d'ouvrir les questionnements relatifs au recours au son pour une communication sur le long terme, et d'avancer des pistes pertinentes afin d'affiner les études. Au regard de la nécessité de l'inclusion du site de stockage dans les activités humaines, il nous faudra observer son potentiel informationnel tout en prêtant attention à ce que sa forme favorise une appropriation culturelle.

IV.4. Ouverture des problématiques liées à la conception d'une signalétique sonore et des outils relatifs

IV.4.1. Vers une conception du marquage sonore : quelques précisions terminologiques

Les présentes recherches constituent la base de réflexions et de travaux sur la dimension sonore d'un éventuel marquage en surface de site d'enfouissement. Il nous faut, pour commencer, ouvrir les questionnements et problématiques sous-jacentes à notre problématique générale, et ainsi proposer une vue d'ensemble des objectifs et des obstacles qui constituent ce pan de la vaste inconnue liée à une situation inédite. De toute évidence, ces questions ne pourront être traitées dans leur totalité. Notre but, après avoir proposé un panel

⁹⁸ *Idem.*

⁹⁹ *Expression* et *contenu* peuvent être assimilées aux notions de *signifiant* et de *signifié*. Ces différentes notions sont définies dans le glossaire, et seront développées plus largement en partie II.

des recherches à mener pour traiter la problématique d'une signalétique sonore, sera d'établir des priorités parmi les axes de recherche.

La condition initiale de réalisation de la thèse est déterminée par le commanditaire, l'Andra, qui a fait le choix entre les deux éléments d'une alternative, c'est-à-dire entre la visibilité du site et la mise en place d'un dispositif d'extériorisation, et l'occultation de ce même site. Elle a opté pour la position inverse de son homologue finlandais pour qui le site d'enfouissement « Onkalo » doit tomber dans l'oubli après destruction des installations et marqueurs témoignant d'un siècle d'activité humaine et industrielle.

Ce choix axé sur la mémoire et l'extériorisation d'une réalité sous-terrainne correspond à une attitude plus générale de réaction compensatoire à l'entropie comme tendance de toute chose ordonnée – ici l'ensemble du futur site de surface de Cigeo – à perdre cet ordre au fur et à mesure que le temps passe¹⁰⁰.

Il faudra donc, dans ces conditions, répondre à une demande de nature à la fois collective et pratique. Plusieurs faisceaux d'information, d'axiologie*¹⁰¹ et de contraintes viennent ainsi infléchir le profil de ces travaux. L'objectif à terme est d'apporter des hypothèses permettant d'envisager des solutions à un problème où interfèrent des exigences **techniques** (mécaniques) et **esthétiques** (poétiques), où d'autre part l'interaction est nécessaire entre réflexion (approche sémiotique) et imagination (effort créatif) pour parvenir à une ou plusieurs proposition(s) de signalétique. Il s'agirait par conséquent pour les recherches sur la modalité sonore du dispositif de trouver un équilibre entre ces faisceaux, et de polariser les recherches de sorte à viser une efficacité et une pertinence des propos, et bien évidemment une cohérence.

Cette entreprise possède donc *a priori* une forte dimension prospective. Celle-ci impose la nécessité de faire la part du *possible* et celle du *probable* dans l'horizon d'inconnues, en fondant le double effort sémiotique et créatif sur ce qui est *certain* au moment où l'étude est réalisée. Ce qui relève du « certain » repose sur les savoirs actuels apportés par les approches neuroscientifiques, cognitivistes, anthropologiques, éthologiques, écologiques spécialisées (biophonie, anthropophonie, géophonie), et sémiologiques. Néanmoins il est clair que, une fois dépassées les connaissances dégagées par la sémiotique, nous restons face à une matière encore peu traitée par celle-ci. La modalité sonore échappe encore largement aux écrits sémiologiques ou sémiotiques, malgré un intérêt grandissant depuis 2015.

Nous suggérons sans plus attendre de poser le cadre général de ce qui va orienter et définir les recherches liées à la modalité sonore du marquage. Nous voyons deux dimensions principales à la signalétique sonore pour le dispositif de marquage du site Cigéo : celles-ci sont définies à la fois par un objectif global, partagé par les différentes composantes du programme mémoire, et par les objectifs propres à la modalité sonore.

Le premier pan est ainsi relatif à la création d'une mémoire collective, à potentiel transculturel¹⁰² ; cette mémoire doit faire l'objet d'une transmission intergénérationnelle, car sa raison d'être réside dans son caractère *pérenne*. L'objectif étant que le dispositif mémoriel permette de porter la mémoire collective du site pendant au moins cinq siècles, et pour une

¹⁰⁰ Le projet « Mémoire » de l'Andra a pour objectif de faire face à l'entropie en tant que quantité d'informations irrémédiablement perdues. Cf. le stockage de l'information sur support pérenne (papier permanent, disque en saphir).

¹⁰¹ Les termes marqués d'un astérisque sont définis dans le glossaire.

¹⁰² Nous nous fondons ici sur les éléments précisés par l'Andra en 2015, date de la formulation du projet de thèse.

durée potentielle de plusieurs milliers d'années. Le second pan relève de la nature du message que le dispositif devra diffuser et porter. Il porte donc sur la qualité informationnelle et la sémantique propres au son.

Voici les deux dimensions générales qui vont modaliser le dispositif sonore dans sa forme et dans ses fonctions. Du point de vue strictement sonore, il s'agit d'observer les effets de sens relatifs aux différentes expressions sonores, à la morphologie du son en elle-même, pour faire jouer des variations sur le principe de l'information contenue et émise. Concernant la dimension mémorielle, il s'agit d'agir sur la structure sonore pour lui conférer un potentiel de durabilité élevé. Mais cela passe également par la nature de la mise en relation de l'émetteur et du récepteur (c'est-à-dire les éléments liés à la confrontation des sujets au dispositif : situation, mode de diffusion, fréquence de diffusion, etc.), ainsi que par le rôle du dispositif sonore au sein du dispositif global. Il en va de même pour le message, qui varie non seulement fonction de la morphologie, mais aussi de la place du son dans un ensemble plus large (la situation, l'environnement), et/ou diffusé en un instant spécifique.

L'équilibre dont nous parlons alors se précise : il résidera en grande partie¹⁰³ dans les relations entre nature du message, pérennité sémiotique et pérennité physique du dispositif de marquage. Le but optimal étant bien entendu d'arriver à une balance des poids accordés à chaque dimension, de sorte, par exemple, que le sens ne soit sacrifié au nom de la pérennité mémorielle – lequel pourrait d'ailleurs, s'il est mal défini, nuire à cette pérennité –, ou bien de la pérennité du dispositif physique. En d'autres termes, et très schématiquement, nous voyons là la base des grands axes de notre problématique : la dimension sémiotique approche la nature informationnelle du message, la dimension mémorielle demande de porter une attention aux connaissances dégagées par les sciences cognitives, et la pérennité physique relève de la nature des matériaux et de la structure nécessaires à la production de son.

Néanmoins nous voyons que les axes sur lesquels jouer débordent d'une dimension à l'autre, la modification d'une variable ne pouvant impacter seulement la nature informationnelle ou la pérennité mémorielle du dispositif. Aussi, il semble qu'on ne puisse se contenter d'aborder les problématiques du dispositif sonore à travers les deux dimensions principales exposées plus haut : information et mémoire. Plus précisément, il nous faut aborder ces problématiques dans une dimension plus pragmatique (au sens général), qui nous permette d'observer les différentes variables de la signalétique sonore, et ainsi profiler plus clairement les critères sur lesquels jouer pour concevoir la signalétique sonore.

Ce qui nous mène à nous questionner sur la modalisation du dispositif sonore, et sur les éléments pertinents qui profilent celle-ci. D'un point de vue plus « pragmatique », donc, il nous faut réduire les axes de variations du dispositif afin de pouvoir considérer plus efficacement notre problématique. En conséquence, nous proposons d'envisager la modalisation selon deux pans : d'une part la morphologie sonore en elle-même, détachée du dispositif physique, et d'autre part la relation entre la modalité¹⁰⁴ sonore et le dispositif global. Le principe fondamental qui permet l'articulation modale de ces deux pans réside dans la *fonction* que l'on peut prêter au dispositif sonore.

¹⁰³ Laquelle n'est, à ce stade, pas mesurable.

¹⁰⁴ La « modalité sonore » désigne la modalité sensorielle. Lorsque nous parlons de « modalité du dispositif », nous faisons référence à la forme et aux variations de formes de celui-ci. Nous verrons plus tard que le terme « modalité » utilisé dans le cadre de la théorie sémiotique désigne des éléments spécifiques observables dans les discours et autres procès impliquant des sujets.

Il convient ici, avant de s'engager dans tout développement, d'apporter quelques précisions terminologiques. Tout d'abord, nous distinguons les différents niveaux de pertinence du dispositif mémoriel de la sorte :

- Le *dispositif sonore* – ou la *signalétique sonore* – réunit à la fois le son en tant que phénomène et morphologie, et le dispositif physique qui sera à l'origine de sa diffusion sur le site. Mais ne sachant pas *a priori* à quoi se limitera ce dispositif, ces termes couvrent également tout ce qui concerne le son en tant qu'il est inclus dans une stratégie de communication et de diffusion, celle du programme Mémoire. En effet, rien n'indique pour le moment qu'il faut restreindre la fonction du son à une localité précise, ses modalités pouvant potentiellement être multiples et à des fins diverses.
- La *morphologie sonore* désigne le son en soi, en dehors de toute considération de structure ou dispositif de diffusion. Il s'agit d'une forme sonore hypothétique, celle effectivement entendue indépendamment de ce qui fait que nous l'entendons – comme nous pourrions parler d'une « chanson » par exemple, nous parlerons de *morphologie sonore*.
- Par opposition et par exclusion, nous ferons appel au *dispositif physique*, en tant que structure physique et matérielle de marquage du site, à l'origine de la diffusion sonore.
- Le *dispositif de marquage*, ou *marquage de site*, renvoi pour sa part au dispositif physique de marquage dans sa globalité, relatif au site d'enfouissement. Il porte donc une valeur de localisation. Il peut s'agir, par exemple, d'un ensemble de haut-parleurs diffusant une séquence sonore, ou bien des mécanismes générant une onde sonore, tels que des carillons. Le dispositif de marquage, global, peut aussi couvrir la totalité des supports permettant de marquer le site, visuels, linguistiques, topologiques, architecturaux.
- Le *dispositif mémoriel* (ou *global*) correspond quant à lui au dispositif de communication dans son entièreté et sous toutes ses formes, supports, stratégies et sous-stratégies, ou modalités.

En bilan de ces premières précisions, nous aborderons les problématiques du son à travers les modalités dégagées par les possibles fonctions attribuées à la signalétique sonore. Nous suggérons alors d'envisager dans un premier temps les modalités relatives à la morphologie, et plus largement la signalétique sonore, en approchant notamment la manière avec laquelle on peut concevoir le message associé à cette morphologie. Dans un second temps, nous considérerons la signalétique sonore par sa relation avec les autres éléments du dispositif mémoriel.

Les différentes fonctions y seront abordées au prisme d'outils sémiotiques « classiques » d'une sémiotique européenne, c'est-à-dire largement fondés sur la théorie d'Algirdas-Julien Greimas¹⁰⁵ et la sémiotique du discours de Jacques Fontanille¹⁰⁶. Concernant ce dernier, nous

¹⁰⁵ Notamment GREIMAS A.-J., *Sémantique structurale : recherche de méthode*, Paris, Larousse, coll. « Langue et langage », 1966, [rééd. utilisée : *Formes Sémiotiques*, Paris, PUF, 2002]. ; *Du sens II*, Paris, Seuil, 1983.

¹⁰⁶ FONTANILLE J., *Sémiotique du discours*, Limoges, PULIM, 2003.

trouvons dans ses propositions¹⁰⁷ une synthèse théorique fournissant des outils opératoires en perspective de notre problématique.

IV.4.2. Sémiotique et découpages du discours : vers une conception de la signalétique sonore

Les « synthèses de l'hétérogène » que Fontanille décrit, explicitées ci-dessous, représentent autant de points de vue permettant d'approcher la fonction du son et la façon dont il peut faire sens pour établir une mémoire de site. Face à l'hétérogénéité¹⁰⁸ du sens, trois dimensions apparaissent dans le discours* comme des « régimes discursifs », lesquels ne sont autres que des « *manière[s] spécifique[s] d'assurer la synthèse de l'hétérogène* »¹⁰⁹. Si ses propositions sont émises en vue d'analyses sémiotiques du discours¹¹⁰, rien ne semble s'opposer à ce qu'on y fasse appel dans un but prospectif, afin de concevoir une signalétique et encadrer les questions sous-jacentes qui se posent dans une telle situation. Les outils d'analyse sémiotique permettant de générer des connaissances sur les dynamiques de construction du sens, il semble cohérent de faire appel à ces découpages pour appréhender un objet culturel et des discours signifiants à construire. De plus, cette sémiotique décrit la signification en faisant le lien entre le sensible et l'intelligible – ce qui nous intéresse au titre du caractère ineffable de la perception sonore¹¹¹. Elle nous semble donc tout à fait indiquée dans la perspective sémiopragmatique¹¹² du programme mémoire. Aussi, ces synthèses de l'hétérogène ou *régimes discursifs* correspondent, au moins dans notre démarche, à différents niveaux de pertinence de la signalétique sonore. Les trois dimensions/synthèses de l'hétérogène se présentent ainsi :

L'**Action** constitue la dimension pragmatique¹¹³ du discours. Elle se fonde essentiellement sur le principe de *transformations*, des changements d'états entre une situation initiale et une situation finale ou médiane (selon le point de vue ou le moment où l'on place notre observation). L'observation se fait à travers les programmes narratifs de la sémiotique greimassienne, témoignant des évolutions et transformations. Ces programmes narratifs passent par la mise en relation de Sujets et d'Objets de valeur, par leur conjonction et/ou leur disjonction dans le discours.

¹⁰⁷ *Idem.*

¹⁰⁸ L'hétérogénéité est décrite comme « une donnée pré-syntagmatique, un état sémiotique antérieur à la mise en séquence et à la reconnaissance des schémas organisateurs (...) ; enfin, [elle] est une propriété des situations « perçues », préalable à une articulation de la présence en intensité et en extension. », FONTANILLE J., *op. cit.*, pp. 197-198.

¹⁰⁹ *Idem.*

¹¹⁰ Jacques Fontanille dit à propos des trois grands régimes discursifs : « *Globalement, il s'agit toujours d'une signification du changement, dans la mesure où nous postulons dès le départ que la signification ne peut être saisie que dans son devenir* ». *Idem*, p. 243. Il s'agit d'ailleurs d'un principe fondamental de la sémiotique.

¹¹¹ Nous reviendrons notamment sur le fait que cette modalité sensorielle dispose de bien moins de descripteurs propres que les modalités visuelles ou haptiques par exemple.

¹¹² En ce que la sémiotique est envisagée comme un outil permettant de concevoir des discours et une communication pertinente pour une problématique communicationnelle précise.

¹¹³ L'utilisation du terme « pragmatique » est à prendre au sens commun – il ne désigne pas dans notre cas la branche de théorie linguistique du même nom – c'est-à-dire au sens suivant : « B. 1. a) Qui concerne les faits réels, l'action et le comportement que leur observation et leur étude enseignent. ». Source : <https://www.cnrtl.fr/definition/pragmatique>

De plus, les relations entre sujets sont relevées à travers les principes de *manipulation*¹¹⁴ et de *sanction* (la sanction peut constituer un principe d'action mais elle peut aussi être d'ordre moral). Par la manipulation, notamment, sont introduites les *modalités* factitives*, telles que le /faire faire/ ou /faire ne pas faire/ et modalisations cognitives avec le /faire savoir/. Nous pourrions ainsi anticiper les objectifs pragmatiques du dispositif mémoire et du dispositif de marquage pour envisager les fonctions de la signalétique sonore à travers ces effets.

Nous voyons ici la possibilité d'envisager des programmes spécifiques pour la signalétique sonore, dans une dimension pragmatique qui nous incite à réfléchir sur l'impact direct en termes de résultat par l'action (ou la réaction) du dispositif sur les sujets percevants. Entre un /faire faire/ et un /faire savoir/, on identifie déjà deux régimes de manipulation différents. Encore faut-il déterminer sur quel plan nous situons cette manipulation : quel destinataire, quel destinataire ; quelle échelle de pertinence dans le dispositif : marquage de site ou dispositif général ?

La **Passion** est tout d'abord le lieu du sensible d'où émergent des affects, émotions, et sentiments. Elle se fonde sur le sensoriel avec, pour fondement de toute expérience du sens, le rapport entre un « corps propre », et des présences, des intensités, des qualités perçues dans un champ de présence. Ce corps sentant est immergé dans un espace perceptif dont les présences infléchissent l'attention. Ces présences, qui peuvent être de natures diverses (êtres, objets, présences désincarnées, sensations), sont saisies par le corps propre selon les variations tensives, c'est-à-dire à travers les rapports d'intensité et d'étendue¹¹⁵ dans l'espace sensible et perceptif.

Elle relève de la dimension *thymique* du discours, la thymie* étant définie comme une « "Humeur, disposition affective de base" (**Petit Robert**) – la catégorie thymique sert à articuler le sémantisme directement lié à la perception qu'a l'homme de son propre corps »¹¹⁶. Greimas nous définit également l'espace thymique dans *Du sens II* par sa position et son rôle dans le parcours génératif* :

« L'espace signifiant qui, au niveau des structures profondes, est articulé à l'aide de la catégorie thymique est à considérer comme homo-topique et comme hétéromorphe par rapport à la totalité des articulations modales régissant, au niveau des structures sémiotiques de surface, les relations entre les sujets et les objets. Autrement dit [...], l'espace thymique qui, au niveau des structures abstraites, est censé représenter les manifestations élémentaires de l'être vivant en relation avec son environnement (cf. /animé/), trouve sa correspondance au niveau plus superficiel, anthropomorphe, du parcours génératif, dans l'espace modal qui, tout en recouvrant le même lieu topique, se présente comme une excroissance et une sur-articulation du premier (et peut être rapproché du terme /humain/). »¹¹⁷

Greimas nous précise la place de la thymie dans la signification, appartenant aux structures profondes et régissant les relations entre le corps propre et les objets de perception,

¹¹⁴ Rappelons que le terme « manipulation » n'a aucune connotation péjorative en sémiotique : elle décrit seulement la façon avec laquelle un sujet peut exercer une influence quelconque sur un autre. Le sujet pouvant d'ailleurs être individuel ou collectif et se présenter sous des formes très variées.

¹¹⁵ Nous expliquons cette théorie en partie II, chapitre III, III.3. « Problématique épistémologique ». Voir également le glossaire, entrée « tensivité ».

¹¹⁶ COURTÉS J., GREIMAS A.J., *Dictionnaire raisonné de la théorie du langage*, Paris, Coll. Université Linguistique, Hachette Supérieur, 1993, p. 396.

¹¹⁷ GREIMAS A.J., *Du sens II*, Paris, Seuil, 1983, p. 95.

par conséquent entre les sujets et les objets. Elle constitue en quelque sorte un levier entre les sensations – le sensible – et le déploiement sémantique pour constituer une sémiotique. La dimension passionnelle est donc une dimension sensible qui organise le monde sensible en dimension phorique (via les affects), chargée positivement ou négativement (*euphorie* vs *dysphorie*), en valeurs, et en objets de signification. Comme le précise Fontanille, « la passion agit, c'est-à-dire qu'elle débouche sur une autre rationalité que la sienne propre »¹¹⁸.

Par conséquent la Passion nous incite à nous pencher sur la dimension perceptive déployée par le son, en particulier par la morphologie sonore, et à penser la façon dont les effets perceptifs et sensibles mènent à la sémantique. Nous voyons déjà ici un niveau de pertinence dans l'appréhension du dispositif sonore par la sémiotique : l'articulation entre la morphologie sonore, les postures fondamentales du sujet percevant vis-à-vis de celle-ci et le déploiement d'une sémantique associée au son et aux affects. Plus encore, cela implique de nous questionner sur la valeur affective que l'on souhaite viser pour concevoir la signalétique sonore. Les trois types de rationalité dont il est question n'étant, au sein du discours, jamais isolés ni totalement indépendants, la passion peut être un préalable à la cognition et à l'action.

Enfin, la **Cognition** est d'ordre épistémique, c'est elle qui donne accès aux informations, à la connaissance. Elle relève donc de la sémantique, du rapport à la connaissance, et correspond à la « logique de la découverte ». Elle permet d'observer la façon dont est appréhendée la connaissance, plus précisément, la façon dont des représentations circulent entre un *informateur* et un *observateur*. Ces représentations, mises en circulation entre ces deux instances, sont alors des *objets de savoir* ou *objets cognitifs*.

Concernant notre objet, il s'agit d'opter pour une position critique quant à la manière dont on va *faire savoir*, dont on va porter à la connaissance des individus parcourant le site, l'existence de celui-ci, sa nature, l'importance de la transmission, et tout autre message éventuel. Entre autres, là où l'action pose la question de l'objectif, du résultat que l'on veut atteindre en termes de comportements des individus, la cognition pose les questions fondamentales du « que veut-on dire » ? Et « comment veut-on le dire » ? Ou encore « Comment faire comprendre » ?

Nous venons d'esquisser le canevas théorique permettant d'aborder l'information et la communication par la modalité sonore à travers son rôle *en soi*. Comme nous le disions, il nous faudra, après développement de ces considérations, l'approcher à travers son rôle en relation avec les autres éléments du dispositif mémoire et du dispositif de marquage de site. Enfin, nous considérerons d'autres variables, cette fois externes au son, constituant des contraintes plus concrètes, moins conceptuelles et théoriques : les variables relatives au site, qui conditionneront la forme du dispositif physique, et par conséquent la forme du son. S'il est évidemment prématuré d'avancer telle ou telle option comme solution, nous disposerons d'une vue d'ensemble des enjeux de la signalétique sonore, ce qui permettra, au fil des recherches, d'écartier certaines possibilités, et d'en favoriser d'autres.

¹¹⁸ FONTANILLE J., *op. cit.*, p. 201.

Conclusions

Pour résumer

La gestion des déchets radioactifs à vie longue, confiée à l'Andra, constitue un des défis techniques et sociétaux les plus importants du XXI^{ème} siècle, et très certainement pour de nombreux siècles suivants. Parmi les solutions étudiées (la séparation/transmutation des éléments radioactifs du combustible usé, la sûreté de l'entreposage des déchets à vie longue, et le stockage en couche géologique profonde) sous l'impulsion de l'Autorité de Sûreté Nucléaire et du Commissariat à l'Énergie Atomique, le stockage profond est considéré comme la plus sûre. Quand bien même des résultats encourageants auraient été obtenus pour les deux premiers axes, aucune autre solution n'aurait permis ni de stopper la radioactivité, ni de constituer une structure suffisamment sûre sur le long terme¹¹⁹.

Le stockage des déchets MA-VL et HA en couche géologique profonde représente un défi technique en termes de réalisation et de sûreté, notamment au vu du principe de réversibilité qui exige de pouvoir changer de voie pendant l'exploitation. Il représente aussi un défi sociétal important et inédit, et ce à échelle internationale. La conception des sites de stockage prévoit certes un scellement des accès et un terrassement futurs qui rendent la probabilité d'une intrusion très basse. Sceller pour toujours engendre des problèmes de responsabilité : les sociétés du XX^{ème} siècle qui ont développé la voie électronucléaire doivent assumer la responsabilité de la gestion des déchets radioactifs, ainsi que celle d'une mémoire de l'existence de ces objets civilisationnels indésirables mais bien présents.

Les échanges internationaux ont permis de poser les bases communes d'une réflexion autour de la constitution d'une mémoire pérenne. Ainsi ont été définies les échelles de projection temporelle dans le cadre spécifique de la mémoire des centres de stockage profond : le *court terme* qui s'étend d'aujourd'hui à la fermeture du site d'exploitation, le *moyen terme* qui s'étend jusqu'à la fin de la surveillance (*oversight*), et le *long terme* qui débute alors que la surveillance s'achève. Les échelles de temps sont variables pour chacun des termes, sauf peut-être pour le court terme dont la durée d'exploitation du site est anticipée (environ un siècle). Le moyen terme peut s'étendre sur une période allant de plusieurs siècles à plusieurs millénaires, et le long terme de quelques millénaires à la centaine de milliers d'années.

La notion de surveillance implique la présence humaine sur site, elle est liée à la notion de contrôle, qui comprend des opérations de maintenance, d'entretien, de conservation des informations (marqueurs et archives, par exemple) et des cadres légaux (servitudes). Elle est dite directe durant la phase d'exploitation du centre de stockage, et indirecte lorsque cette exploitation est terminée.

Le principe d'une perte de surveillance, et donc d'entrée dans la phase du long terme, implique une perte de l'intérêt et très probablement de la mémoire du site. L'objectif premier du programme mémoire (en France) et du projet RK&M (à l'international) est de repousser au plus loin le passage du moyen terme au long terme, c'est-à-dire le moment où la surveillance n'existera plus. Le relai de la mémoire résiderait alors dans des traces de l'activité humaine, traces laissées par un marquage en surface et/enfoui. La question de l'interprétation de ce type de « résidus » est un problème encore sans réponse : la compréhension universelle et pérenne ne semble pas pouvoir exister en dehors d'un foyer culturel donné.

¹¹⁹ Sans aborder des « options » telles qu'envoyer les déchets dans un pays étranger (ce qui serait irresponsable), les jeter dans la mer (ce qui serait destructeur), ou encore les envoyer dans l'espace (ce qui serait extrêmement dangereux et se ferait à des coûts littéralement astronomiques).

Ainsi, la « dual-track strategy » suggère que l'on pense la mémoire des sites d'enfouissement selon deux angles complémentaires : celui d'une communication médiée et celui d'une communication non médiée. Au sein de cette stratégie et de cette communication, supports, messages et relais sont les trois piliers d'une construction de la mémoire.

Perspectives sonores

Le *programme mémoire* est un programme de recherches et d'initiatives créatives ouvrant sur les différentes modalités offertes par ces trois « piliers ». Simultanément à la constitution d'un fonds et d'une veille bibliographique, aux études portant sur la communication à long terme, sur la pérennité des langues ainsi que des expressions visuelles, pour ne citer qu'elles, le Centre de Recherches Sémiotique de Limoges a engagé en 2015 les réflexions sur le rôle possible de la modalité sonore au service de la mémoire pérenne.

Le cadre de ce programme était initialement inclus dans la réflexion sur une communication en vue de la mémoire au long terme. Cela impliquait donc d'explorer les pistes permettant d'envisager un message sonore susceptible d'être autonome, au sens où il ne nécessiterait pas de médiation. Or, la communication non médiée porte, nous l'avons vu, sur des supports et messages durables, en particulier sur un marquage pérenne du site d'enfouissement.

L'objectif premier était donc d'établir une signalétique sonore permettant de porter une information sur le long terme, assurée par une indépendance mécanique et énergétique vis-à-vis de l'intervention humaine. La recherche de l'universalité, si fragile ce concept puisse-t-il être lorsque l'on parle de phénomènes sémiotiques, dirigeait en partie nos explorations en vue de faire sens à la fois à l'échelle interculturelle et dans le temps.

Or, comme pour nombre de travaux de recherches, cet horizon a dû être reformulé¹²⁰. En effet, l'objectif d'un dispositif sonore permettant d'exprimer un message faisant consensus sur une échelle de temps aussi importante (plusieurs milliers d'années), relève de l'utopie. L'utopie n'est certainement pas un mal lorsqu'il s'agit de penser la communication et la mémoire à échelle pluriséculaire, voir plurimillénaire. Elle peut être un terrain fertile à des propositions aussi inattendues qu'intéressantes. Mais dans le cadre d'une approche scientifique, qui plus est touchant aux processus sémiotiques, au monde signifiant et à la perception (puisqu'elle semble fondamentale lorsque nous approchons le son plutôt qu'un langage codifié), la perspective vertigineuse de l'éternité (ou presque) demande à être quelque peu réduite. Même si ces travaux n'ont pas pour ambition d'apporter des réponses définitives et des solutions ultimes, notre matrice de pensée devait être réexaminée non seulement pour gagner en pertinence – et probablement en opérativité – mais également pour ouvrir le champ d'explorations de nos recherches – ne serait-ce qu'à l'égard de la difficulté technique d'un marquage sonore plurimillénaire. S'agissant d'une problématique encore très peu explorée, il est intéressant d'ouvrir les questionnements et les possibilités pour mieux refermer les voies qui seraient irréalistes ou impertinentes.

Aussi l'horizon du moyen-terme semble-t-il plus « abordable » : celui où la présence humaine porte les discours du site de stockage. Dans ce cas, viser l'universalité sans qu'elle ne soit un objectif exclusif permet d'envisager des discours sonores¹²¹ ayant un potentiel intersubjectif élevé, tout en assumant la nécessité de leur inclusion dans un contexte spatio-temporel et culturel donné. Par ailleurs, dès lors que des discours sonores peuvent être émis en vue d'une

¹²⁰ Cette reformulation sera notamment visible à travers les chapitres de la Partie I.

¹²¹ Pour reprendre les termes d'Eleni Mitropoulou, qui suggère que le site et les connaissances afférentes constituent un discours composé lui-même de sous-discours. MITROPOULOU E., *op cit.*

appropriation culturelle, la diversité des formes de l'expression sonore s'en trouve moins restreinte, notamment au vu du fait qu'elles ne seront pas nécessairement figées. La conception d'un système de diffusion sonore pérenne contraindrait certainement très fortement la morphologie du son.

Enfin, cette reformulation permet de ne pas restreindre le son à un marquage de site. L'ouverture se fait donc également sur les fonctions que pourrait assurer le son. Il ne serait plus conçu *a priori* comme une morphologie fixe qui a pour but d'exprimer une information précise et unique. Ainsi, la question qui se pose est de savoir en quoi le son peut contribuer à établir une mémoire du site et favoriser sa transmission, sur le plan le plus large qui soit.

Comme toute recherche, nous faisons face à un nombre de questions quasiment inépuisable. Parmi elles, nous pouvons déjà formuler celles qui s'imposent en premier lieu, alors que l'objet et les méthodes restent à définir : quelle(s) fonction(s) le son peut-il assumer, en tant que marqueur et/ou en tant que moyen de communication médiée ? Comment envisager une signalétique sonore au sein d'un marquage de site, sur le plan technique aussi bien que sur le plan sémiotique ? Quelle place doit-il tenir au sein d'un système de marquage ? Mais avant cela, comment le son fait-il sens ? Peut-il, lui aussi¹²², viser au plus proche l'universalité dans son expression ? De quel potentiel d'inscription mémorielle dispose-t-il, dans un premier temps à l'échelle individuelle ? Par conséquent, comment fonctionne la mémoire liée à la perception du monde sonore ? Et plus globalement, comment fonctionne ce qui précède l'inscription mnésique, la perception sonore en elle-même ?

Il s'agit donc à présent de considérer la diversité des questionnements qui émergent, d'ouvrir les problématiques qui se présentent afin de réduire nos objectifs. À cet égard, nous procéderons à une première approche sémiotique et globale de ce qu'on l'on nomme « son » et des possibilités conceptives qu'il peut offrir. Pour cela, nous définirons les différents niveaux de pertinence permettant d'approcher le son dans la perspective du programme mémoire (parle-t-on de la morphologie sonore ou de la modalité perceptive ? Du son au service d'un marquage de site ou bien d'une communication médiée ? *etc.*). Nous l'aborderons ensuite à travers des découpages du discours issus de la sémiotique de A.-J. Greimas et J. Fontanille, dans l'optique de clarifier et de segmenter la diversité de notre objet.

¹²² À l'instar des expressions visuelles.