



BERNARD LAPONCHE

Les déchets nucléaires

Que faire des produits fatals de l'industrie électronucléaire ?

Les déchets radioactifs présents en France proviennent majoritairement des industries de la production d'électricité d'origine nucléaire, mais aussi de la recherche, des usages militaires, des industries non nucléaires et de la médecine nucléaire. C'est à partir de l'extraction de l'uranium, matière première du fonctionnement des réacteurs nucléaires, que se déroulent les différentes étapes des industries électronucléaires, étapes dont chacune, sans exception, donne lieu à la production de déchets radioactifs particulièrement dangereux pour la santé humaine et l'environnement.

Bernard Laponche est polytechnicien, docteur ès sciences en physique des réacteurs nucléaires et docteur en économie de l'énergie. Il a travaillé au Commissariat à l'énergie atomique (CEA), puis sur les questions de maîtrise de l'énergie comme directeur général de l'Agence française pour la maîtrise de l'énergie (aujourd'hui ADEME) et consultant international.

LES DÉCHETS RADIOACTIFS DE L'INDUSTRIE ÉLECTRONUCLÉAIRE

DE LA MINE D'URANIUM AU RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Environ deux cent cinquante sites miniers d'uranium ont été explorés ou exploités en France entre 1945 et 2001 ; ils ont représenté une production d'environ 72 800 tonnes. Depuis, l'uranium utilisé pour fabriquer le combustible des réacteurs des centrales d'EDF est totalement importé, du Niger, du Canada et plus récemment du Kazakhstan.

Les résidus des mines d'uranium sont de deux types : les stériles miniers (petits blocs de tailles diverses, non exploités) et les résidus de traitement des roches finement broyées (dont l'uranium a été chimiquement extrait). Ces résidus correspondent

PAGE PRÉCÉDENTE
Émilie Vialet, *Monts d'Arrée #003*,
2009-2010.

RADIOACTIVITÉ ET RADIOTOXICITÉ

La radioactivité est un phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables, dits radio-isotopes, se transforment spontanément (“désintégration”) en dégageant de l’énergie sous forme de rayonnements divers, en des noyaux atomiques plus stables ayant perdu une partie de leur masse : les rayonnements dits “alpha” α (noyau de deux protons et deux neutrons), “bêta” β (électron) et “gamma” γ (photon), aux effets très différents du fait de masses, de niveaux d’énergie et de pouvoirs de pénétration très distincts.

La radioactivité d’un corps se mesure en “becquerels” (Bq) : 1 Bq représente une désintégration par seconde. Cette unité est très petite ; on utilise couramment ses multiples, dont le “terabecquerel” (TBq : 10^{12} ou mille milliards de becquerels). La plus ou moins grande concentration des matières radioactives dans un milieu donné (un déchet par exemple), et surtout l’intensité du rayonnement des éléments radioactifs concernés, déterminent une activité massique, exprimée en nombre de désintégrations par seconde et par unité de masse considérée (par exemple : becquerel par gramme, Bq/g).

Afin de définir le risque pour le vivant, chaque produit radioactif est qualifié par trois caractéristiques : la durée de vie, la radioactivité et la radiotoxicité.

La durée de vie traduit le rythme auquel la radioactivité décroît. Chaque élément radioactif est ainsi caractérisé par une durée, appelée “demi-vie” ou quelquefois “période”, à l’issue de laquelle sa quantité diminue de moitié par désintégration de ses atomes (formant un ou plusieurs éléments, à leur tour radioactifs ou stables). Sa radioactivité est donc réduite d’un facteur 2 à chaque demi-vie, et par extension d’un facteur 1000 environ après dix demi-vies. Les demi-vies

s’échelonnent de quelques fractions de seconde à quelques milliards d’années : par exemple 8 jours pour l’iode 131, 30 ans pour le césium 137, 24 000 ans pour le plutonium 239 et 4,5 milliards d’années pour l’uranium 238.

Il est possible d’évaluer l’effet biologique néfaste d’un rayonnement sur une personne au moyen d’un calcul faisant intervenir des coefficients de pondération liés à la nature du rayonnement incident et aux types de tissus et organes atteints. Le sievert (Sv) est l’unité de dose biologique utilisée pour mesurer les effets sur le corps humain de cette absorption. La valeur en sievert d’une dose de rayonnement est calculée à partir de l’intensité de la source de rayonnement externe à l’organisme ou de l’activité incorporée dans l’organisme (exprimée en becquerels) par voie respiratoire ou digestive.

À énergie égale délivrée à un tissu ou un organe, la dose qui résulte d’une particule alpha est vingt fois plus toxique que celle d’un gamma ou d’un électron. La nature du rayonnement est donc très importante. Par exemple, si des particules de plutonium sont inhalées ou ingérées, elles irradient directement les organes où elles sont déposées (le poumon dans le cas d’une inhalation). Une fraction du plutonium inhalé ou ingéré passe dans le sang et se dépose dans le foie et les surfaces osseuses notamment. En termes de radioprotection, la limite de dose annuelle induite par une activité nucléaire est, pour le public, de 1 millisievert (mSv) par an. Pour ce qui concerne le plutonium, cela correspond à une inhalation d’environ un centième de microgramme. Une quantité de l’ordre d’une dizaine de milligrammes est susceptible d’être à l’origine du décès d’une personne ayant inhalé, en une seule fois, de fins aérosols d’oxyde de plutonium.

aux minerais économiquement exploitables dont a été extrait l’uranium. Ils présentent trois types de problème pour la radioprotection : l’eau de drainage peut entraîner des radionucléides par lixiviation et devenir non potable du fait de sa radiotoxicité ; des poussières radioactives peuvent s’envoler et contaminer les habitants (et surtout les ouvriers dans le cas d’une exploitation) par voie respiratoire ; les résidus de la chaîne de désintégration de l’uranium 238 contiennent du radium 226, qui produit en continu un gaz radioactif, le radon 222 : c’est le principal risque à long terme parce que la mémoire de la présence de résidus miniers peut s’être perdue entre-temps. Par ailleurs, indépendamment de cette problématique de radioprotection, les stériles ou résidus miniers peuvent poser des problèmes de toxicité chimique, quand l’uranium est présent avec d’autres produits par ailleurs toxiques (plomb, arsenic, etc.).

L’uranium naturel, importé sous forme d’oxyde d’uranium, est ensuite converti en France pour permettre son “enrichissement”¹ afin de fabriquer les combustibles pour les réacteurs des centrales nucléaires. L’enrichissement produit des quantités importantes d’uranium appauvri qui est, pour la plus grande part, entreposé en l’attente d’une éventuelle valorisation ultérieure (il est utilisé en partie pour les combustibles MOX). De ce fait, l’uranium appauvri n’est pas considéré comme un “déchet nucléaire”, que ce soit juridiquement ou économiquement. Fin 2013, il y avait 290 000 tonnes entreposées sur les sites AREVA du Tricastin et de Bessines-sur-Gartempe.

DU COMBUSTIBLE NEUF AU COMBUSTIBLE IRRADIÉ

Un réacteur équipant une centrale nucléaire productrice d’électricité est une chaudière dans laquelle la chaleur, au lieu d’être produite par la combustion du charbon par exemple, est produite par les fissions des noyaux d’uranium 235 contenus dans le combustible (des “crayons” d’oxyde d’uranium), auxquelles s’ajoutent les fissions du plutonium 239, produit à partir de l’uranium 238 par des réactions nucléaires autres que la fission. La fission est en quelque sorte une explosion du noyau d’uranium 235, provoquée par sa rencontre avec un neutron qui donne naissance à deux ou trois produits de fission, morceaux du noyau initial, et à plusieurs neutrons qui, à leur tour, vont provoquer des fissions dans les noyaux voisins : c’est la réaction en chaîne. La propulsion à grande vitesse de ces produits de fission par cette explosion engendre une énergie mécanique qui se transmet à l’ensemble du milieu et provoque la montée en température du combustible (origine de la chaleur qui va permettre de produire de l’électricité).

1. L’enrichissement de l’uranium est une opération industrielle consistant à augmenter la teneur en uranium 235 à partir de l’uranium naturel : 3 à 5 % de teneur en uranium 235 (contre 0,71 % dans l’uranium naturel) pour les combustibles des réacteurs des centrales nucléaires françaises en fonctionnement.

Les cinquante-huit réacteurs qui équipent les dix-neuf centrales nucléaires françaises en fonctionnement aujourd'hui appartiennent à la filière des réacteurs à eau² sous pression (REP ou PWR en anglais³) et à uranium enrichi. À l'intérieur des éléments combustibles, les produits de fission instables se transforment par désintégration en émettant des rayonnements. Les transuraniens (dont le plutonium), éléments dont le nombre de masse (total des neutrons et des protons contenus dans le noyau) est supérieur à celui de l'uranium, sont produits par captures de neutrons dans le réacteur et sont également radioactifs.

La transformation du combustible neuf en combustible usé porte sur moins de 5 % de la masse, mais les conséquences radiologiques sont fondamentales : le combustible déchargé est considérablement plus radioactif que le neuf. Si une large part de cette radioactivité disparaît en quelques jours à quelques semaines, la radioactivité du combustible usé reste, à long terme, plus d'un million de fois plus élevée que celle du neuf.

En dehors de la matière première de l'industrie nucléaire, l'uranium, les différentes matières fabriquées au cours des réactions nucléaires dans les réacteurs présentent des dangers de plusieurs natures. Les produits de fission se caractérisent par leur très forte radioactivité en rayonnement gamma à haute énergie, dangereux pour l'homme même à grande distance, mais sur des temps relativement courts (quelques centaines d'années). Les actinides, produits dans le réacteur à partir de l'uranium, comprenant le plutonium et une série d'autres éléments appelés actinides mineurs, sont essentiellement émetteurs de rayonnements alpha et bêta, dont la portée est beaucoup plus faible. Si l'on peut s'en protéger assez facilement (par exemple par des écrans de faible épaisseur), ils deviennent très dangereux en cas d'inhalation ou ingestion.

LE SORT DES COMBUSTIBLES IRRADIÉS

À la fin de leur utilisation dans le réacteur nucléaire (après trois ou quatre ans environ), les combustibles irradiés sont stockés sous eau dans des "piscines" situées à proximité des réacteurs. Ils sont constamment refroidis par circulation d'eau afin d'évacuer la chaleur produite par la radioactivité des produits de fission et des transuraniens (dont le principal est le plutonium) qu'ils contiennent. La solution adoptée dans la majorité des pays équipés de centrales nucléaires (États-Unis, Allemagne, Suède, Japon, Corée du Sud...) est de garder les combustibles irradiés

PAGE SUIVANTE

Jürgen Nefzger, *Chinon, France*, 2003, de la série "Fluffy Clouds".

2. L'eau (ordinaire) joue à la fois le rôle de modérateur (ralentisseur de neutrons) et de fluide caloporteur qui sert à transmettre la chaleur produite dans le réacteur à un échangeur qui produit de la vapeur, qui à son tour produit de l'électricité grâce au turbo-alternateur.

3. REP : Réacteur à eau sous pression ; PWR : Pressurized Water Reactor.





en l'état, de les laisser dans les piscines de stockage, et, après quelques années éventuellement, dans des installations de stockage à sec lorsque leur radioactivité et la chaleur qu'ils dégagent ont suffisamment diminué.

Par contre, en France (La Hague) et au Royaume-Uni (Sellafield), le plutonium est extrait des combustibles irradiés dans une usine dite de "retraitement", aujourd'hui essentiellement à partir des combustibles de leurs propres centrales, mais aussi, dans le passé, à partir des combustibles "étrangers" (Allemagne, Belgique, Italie, Japon, Pays-Bas, Suède, Suisse...). Le retraitement consiste à séparer, par voie chimique, les trois grands composants du combustible irradié : uranium, plutonium, produits de fission et transuraniens (autres que le plutonium). Cette technique a été historiquement développée durant la Seconde Guerre mondiale pour la production de plutonium à des fins militaires (la "bombe atomique", qui peut également fonctionner avec de l'uranium 235 obtenu par enrichissement poussé de l'uranium naturel). Puis la production de plutonium a été poursuivie et amplifiée pour fournir du combustible à la filière des surgénérateurs : Phénix et Superphénix en France⁴.

En parallèle à cette utilisation, un nouveau combustible a été imaginé pour se substituer au combustible classique à uranium enrichi dans les réacteurs à eau. Appelé MOX⁵ (oxyde mixte d'uranium et de plutonium), il contient de l'uranium appauvri en uranium 235 et 7 à 9 % de plutonium. Superphénix ayant été définitivement arrêté et la filière abandonnée, le MOX s'est trouvé être le "débouché" d'une partie importante du plutonium produit par le retraitement. Il reste cependant des quantités importantes de plutonium entreposées à l'usine de retraitement de La Hague (de l'ordre de 56 tonnes fin 2013, dont 39,5 appartiennent à la France). On estime généralement qu'il faut entreposer soixante ans en piscine près du réacteur un combustible irradié à base d'uranium avant stockage ou retraitement mais, à conditions égales, cent cinquante ans en piscine un combustible MOX irradié – et ce dernier n'est pas retraité.

L'uranium issu du retraitement – à ne pas confondre avec l'uranium appauvri issu de l'enrichissement – contient encore un pourcentage d'uranium 235 d'environ 1 %, supérieur à celui de l'uranium naturel. Il pourrait donc être ré-enrichi, mais sa manipulation est rendue plus difficile et dangereuse par la présence de produits de fission et de quelques transuraniens. Produit à La Hague, il est essentiellement stocké sur le site AREVA de Pierrelatte dans la Drôme. Le total entreposé était de 27 000 tonnes fin 2013.

PAGE PRÉCÉDENTE
Jürgen Nefzger, *Cruas, France*,
2003, de la série "Fluffy Clouds".

4. Un surgénérateur est un réacteur dans lequel les fissions sont provoquées par des neutrons "rapides", et qui doit produire plus de plutonium qu'il n'en consomme.

5. Les surgénérateurs fonctionnent aussi avec un combustible au plutonium, dont la teneur en plutonium est beaucoup plus élevée (supérieure à 20 %) que celle des MOX.

LE DÉMANTÈLEMENT DES CENTRALES ET USINES NUCLÉAIRES

Les matériaux constitutifs des installations nucléaires subissent des irradiations neutroniques prolongées, qui génèrent des produits d'activation par capture neutronique. De ce fait, ils peuvent devenir plus ou moins radioactifs. Cette radioactivité induite dépend des éléments présents dans ces matériaux, à l'état de constituants ou de traces, et du flux neutronique auquel ils ont été soumis.

Le démantèlement d'une centrale nucléaire produit 80 % de déchets "conventionnels" et 20 % de déchets radioactifs qui, pour la grande majorité, sont de très faible activité. Le reste représente essentiellement des déchets de faible et moyenne activité à vie courte. Le cas est le même dans les usines du combustible nucléaire et dans toutes les installations des usines de retraitement des combustibles irradiés, pour lesquelles les opérations sont beaucoup plus complexes que pour les centrales nucléaires, et la quantité et la dangerosité des déchets beaucoup plus importantes.

DES SOLUTIONS DE STOCKAGE PERTINENTES ?

DES MATIÈRES NON VALORISABLES

Le terme de "déchet radioactif" est réservé, par analogie avec les déchets les plus ordinaires, à des substances radioactives sans réutilisation prévue. Plus précisément, la loi de 2006⁶ définit les déchets radioactifs comme ceux pour lesquels aucune utilisation n'est prévue ou envisagée. La catégorie "déchets nucléaires" se détermine donc par opposition à celle des "matières valorisables", qui désigne l'ensemble des matériaux issus de la gestion passée ou actuelle et qui contiennent des quantités significatives de matières fissiles (susceptibles de fission) ou fertiles (susceptibles d'être converties en matières fissiles). En pratique, le terme "matières valorisables" dans le domaine nucléaire concerne l'uranium et le plutonium, sous toutes leurs formes, dans la chaîne de production, d'utilisation et de retraitement du combustible nucléaire. La notion de déchet nucléaire ne fait par conséquent référence ni à la dangerosité des matières en question, ni au temps de présence de ces matières sur le sol national, mais uniquement à leur caractère recyclable ou non. Quelle que soit l'appellation – déchet ou matière valorisable –, le retraitement des combustibles usés sépare les composants en trois familles : uranium, plutonium, produits de fission et transuraniens hors plutonium. L'uranium de retraitement n'est pas réutilisé. Le plutonium peut l'être en partie dans les combustibles

6. Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.

CARACTÉRISATION ET QUANTITÉ DES DÉCHETS RADIOACTIFS EN FRANCE

Les différents types de déchets sont regroupés en grandes catégories, principalement selon la durée de vie et le niveau de radioactivité. La classification en vigueur en France, basée sur ces critères et sur les filières correspondantes de gestion des déchets (mises en œuvre, simplement définies ou même seulement envisagées), retient :

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

L'association de ces deux critères permet de définir les catégories de déchets. Pour chacune, nous indiquons les volumes des déchets existants fin 2013, ainsi que leur part dans la radioactivité totale des déchets, présents en France, de l'ensemble des activités qui engendrent des déchets radioactifs :

- TFA (très faible activité) : 440 000 m³ – moins de 0,01 % de la radioactivité totale ;
- TFA-VC (très faible activité, vie courte) : essentiellement des gravats et ferrailles, issus du démantèlement, et des déchets industriels spéciaux ;
- TFA-VL (très faible activité, vie longue) : résidus miniers et du traitement de l'uranium, uranium du retraitement, uranium appauvri (de l'enrichissement) ;
- FMA-VC (faible et moyenne activité, vie courte) : issus de l'exploitation, de la maintenance et du démantèlement des installations industrielles et de recherche du nucléaire ; 880 000 m³ – 0,02 % de la radioactivité totale ;
- FA-VL (faible activité, vie longue) : déchets de procédés d'assainissement ou de démantèlement, notamment graphite irradié et déchets radifères ; 91 000 m³ ;
- MA-VL (moyenne activité, vie longue) : structures de combustibles et déchets du retraitement (gainés, boues, bitumes...) ; 44 000 m³ – 4 % de la radioactivité totale ;
- HA (haute activité) : combustibles usés en l'état ou, dans le cas du retraitement, déchets vitrifiés et plutonium ; 3 200 m³ – 96 % de la radioactivité totale.

Fin 2013, les déchets HA représentent donc 0,22 % des volumes de déchets nucléaires (1,46 million de m³ au total) et 98 % de la radioactivité totale (225 millions de TBq).

mox, mais sa fission produira à son tour de nouveaux produits de fission. Les produits de fission et transuraniens, dans la mesure où la transmutation n'est pas utilisée, restent présents, et leur quantité ne diminuera qu'avec leur décroissance radioactive. Le retraitement ne réduit pas la dangerosité des déchets ; par contre, il "isole" le plutonium, un élément particulièrement dangereux et utilisable pour la fabrication d'armes nucléaires.

La France compte à ce jour trois centres de stockage exploités par l'ANDRA⁷, qui concernent les déchets représentant les plus gros volumes – hors déchets miniers – mais contenant le moins de radioactivité. Le Centre de stockage de la Manche (CSM) contient 527 225 m³ de déchets faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC) issus de l'exploitation des réacteurs, des centres d'étude et des usines nucléaires, y compris du retraitement à La Hague qu'il jouxte ; exploité de 1969 à 1994, il est entré depuis 2003 dans une phase de surveillance. Le Centre de stockage de l'Aube (CSA), à Soulaines, contenait fin 2012, selon l'ANDRA, 290 000 m³ de déchets du même type que le CSM, pour une capacité de un million de m³ ; exploité depuis janvier 1992, il est prévu pour fonctionner pendant une soixantaine d'années. Le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (CIRES), à Morvilliers (Aube), contenait fin 2012, selon l'ANDRA, 227 449 m³ de déchets de très faible activité (TFA) principalement issus du démantèlement ; ouvert depuis 2003, il a une capacité de 650 000 m³, qui ne sera pas suffisante pour accueillir l'ensemble des déchets de ce type attendus des installations existantes.

Une part non négligeable des déchets relevant de ces catégories reste, malgré l'existence des centres de stockage, entreposée sur différents sites de l'industrie nucléaire, en attente d'une solution. Il s'agit de déchets, en général anciens, qui ne présentent pas un conditionnement adapté aux exigences techniques d'acceptation dans ces centres.

L'AMORCE D'UN DÉBAT PUBLIC

Dès les années 1980, l'industrie nucléaire et la puissance publique s'orientaient vers l'idée d'un stockage géologique en profondeur des déchets les plus dangereux et décidaient de lancer des recherches sur l'identification et la validation de sites favorables dans différents types de formations rocheuses sur le territoire national. Face aux oppositions très fortes des populations locales, le gouvernement décida en 1989 un moratoire sur la recherche des sites.

La loi de 1991⁸ a ensuite fixé les axes d'un programme de recherche sur la gestion des déchets radioactifs, selon trois axes : séparation et transmutation des éléments radioactifs à vie longue ; stockage réversible ou irréversible dans des formations géologiques profondes ; entreposage de longue durée en surface. Son application s'avéra beaucoup plus difficile que prévu. La plus grave lacune – car elle atteint la légitimité même du processus – fut l'impossibilité pour les pouvoirs publics d'implanter plus d'un laboratoire de recherche souterrain. Après la désignation d'un site "argile" à Bure⁹, aux confins des départements de la Meuse et de la Haute-Marne, l'échec de la recherche d'un site "granite", du fait du refus des populations, consacrait le non-respect de la loi.

Prenant acte de ces difficultés et des nombreuses interrogations sur la stratégie même de gestion des déchets, le gouvernement a demandé à la Commission nationale du débat public (CNDP) de consacrer en 2005, pour la première fois, un débat, non pas, comme elle en avait l'habitude, à un projet industriel concret, mais bien plus globalement à une question générique, celle du devenir des déchets nucléaires. Très vite, le débat public a mis en évidence l'ambiguïté des termes utilisés (déchets et matières dites valorisables), et montré qu'il fallait élargir la problématique à l'ensemble des matières nucléaires dangereuses. Outre ce travail essentiel de clarification, le débat a aussi fait émerger une idée nouvelle pour la gestion à moyen et long terme des déchets de haute ou moyenne activité. Alors que les pouvoirs publics proposaient comme unique solution l'enfouissement définitif de ces matières en creusant des dizaines de kilomètres de galeries souterraines dans une couche géologique profonde, le concept d'"entreposage pérenne" a été proposé – un entreposage de longue période sécurisé, par opposition au stockage définitif, ce qui permet la réversibilité effective des choix.

La loi de juin 2006 qui a suivi n'a pratiquement pas pris en compte ces deux avancées importantes. L'ambiguïté de la notion de déchets nucléaires est restée entière puisque le terme "déchet radioactif" continue à être limité à des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ni "envisagée". D'autre part, "le stockage en couche géologique profonde" y est réaffirmé comme solution de référence ; il est assorti de l'adjectif "réversible" sans que ne soit défini précisément ce principe de réversibilité. Enfin, le terme d'entreposage reste réservé à des opérations de nature temporaire. La loi prévoit également l'organisation d'un débat public sur l'installation de stockage géologique.

8. Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (*Journal officiel*, n° 1, 1er janvier 1992), codifiée par les articles L.542-1 et suivants du Code de l'environnement.

9. Deux types de couches géologiques sont considérées pouvoir accueillir des déchets radioactifs pour leur capacité de "maintien" : l'argile et le granite. Les anciennes mines de sel ont été également étudiées, mais l'échec du stockage d'Asse en Allemagne a disqualifié cette solution. Le sous-sol du site est favorable pour l'argile et c'est une région peu peuplée et relativement pauvre, ce qui a aussi orienté les choix.

7. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, créée en 1979 et devenue un établissement public industriel et commercial par la loi du 30 décembre 1991, complétée par la loi du 28 juin 2006.

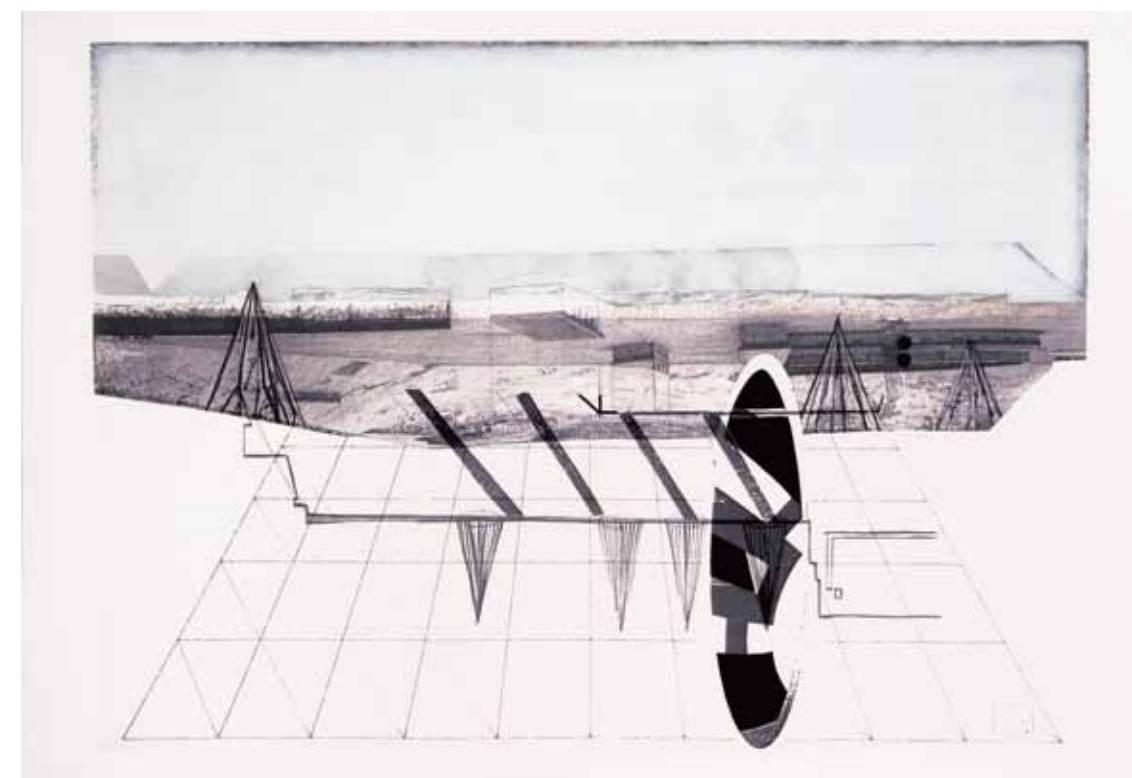
C'est sur ces bases législatives que l'ANDRA a d'abord réalisé et exploité le laboratoire de recherche de Bure sur le stockage en profondeur (sans inclusion de matières radioactives), puis élaboré le projet CIGEO¹⁰ de stockage géologique réversible des déchets nucléaires. Ce projet, conformément à la loi, a fait l'objet en 2013 d'un débat public sous l'égide de la CNDP, qui a soulevé d'importantes controverses portant à la fois sur la consultation citoyenne, la pertinence du stockage en profondeur dans la croûte terrestre et la sûreté, le coût et la fiabilité à long terme du CIGEO. Ce débat a été complété par une conférence de citoyens organisée de décembre 2013 à février 2014 : les participants ont proposé de "prendre du temps" pour mener une opération de démonstration en site réel, pendant un temps significatif, et des recherches sur les différentes voies de gestion. Mais dans la pratique, le choix prématuré du stockage en couche géologique profonde a éliminé les solutions alternatives et restreint l'étude de moyens effectifs de réduction de la quantité et de la nocivité des déchets radioactifs.

LA GESTION DES DÉCHETS : DES ENJEUX TECHNIQUES, ÉCONOMIQUES, ÉTHIQUES ET POLITIQUES

L'enfouissement de déchets radioactifs en profondeur dans la croûte terrestre n'est cependant pas une solution acceptable. Peut-on vraiment "garantir", comme prétend le faire le projet CIGEO, un stockage sans encombre pendant plus de cent mille ans, voire un million d'années ? Certes, les expériences réalisées sur les couches géologiques permettent de calibrer des modèles complexes, mais nul ne peut s'engager sur des événements géologiques inattendus, et aujourd'hui probablement inimaginables, ni se prémunir contre des accidents dans les stockages ou des infiltrations d'eau, à moyen et long terme.

DES RISQUES À PRÉVOIR

Trois types de problèmes de sûreté ont déjà été identifiés pendant la durée de la phase d'exploitation (une centaine d'années) : la nature et la qualité des "colis" de déchets radioactifs (surtout les MA-VL qui sont de trente-deux types différents, définis dans l'*Inventaire* ANDRA 2012), ainsi que les critères de leur acceptation pour le stockage CIGEO ; les risques liés à la production d'hydrogène (inflammation, explosion), nécessitant une ventilation puissante assurée en permanence ; les risques



PAGE SUIVANTE EN HAUT
Cécile Massart, *Site de Soulaines, France*, 2001. Photo imprimée en D. Print couleur, 100 x 70 cm.

EN BAS
Cécile Massart, *La conscience du paysage*, 2009, de la série "Cover". Dessin et D. Print sur papier, 155 x 110 cm.

10. Centre industriel de stockage géologique.

d'incendie (présence de batteries, de bitume, d'hydrogène) avec accélération possible du feu par la ventilation. D'autre part, la question des moyens de fermeture des alvéoles est un problème majeur pour le long terme (risque d'attaque des déchets stockés par les infiltrations d'eau).

Des expérimentations et des études sont encore en cours. Peut-être faudra-t-il en conclure, par exemple, que l'on ne doit pas accepter des déchets bitumés ou produisant de l'hydrogène. L'infiltration d'eau dans des couches géologiques est probablement le principal risque "technique" à long terme, sans doute inévitable : reste à savoir au bout de combien de temps des eaux chargées d'éléments radioactifs pourraient remonter à la surface. Et cela quelle que soit la nature de la couche géologique concernée, l'argile étant toutefois plus favorable que le granite vis-à-vis de ces infiltrations possibles.

UN CHOIX CITOYEN

L'autre interrogation fondamentale concerne la perte de mémoire de ce stockage souterrain. Certes, ce problème est étudié et les idées ne manquent pas. Selon les uns, l'objectif de l'enfouissement des déchets étant de les "faire disparaître", la meilleure solution serait de ne rien signaler aux générations futures et de confier à la géologie le soin de les maintenir bien calfeutrés et ignorés. Pour les autres, il faut au contraire faire le maximum pour signaler, sur la longue période, la présence de ce lieu souterrain de risque majeur. Mais on parle de siècles et de millénaires ; que sera cette région dans ces temps lointains ? Et, quelles que soient les précautions prises, information donnée ou non, suffisamment de bouleversements de toute nature peuvent survenir.

À court et moyen terme, ce qui paraît le plus grave est que si la France, "championne du nucléaire", adoptait cette solution d'enfouissement en profondeur, il n'est pas difficile d'imaginer que de nombreux États et entreprises s'empresseraient de "faire comme la France". Ce modèle idéal serait internationalement adopté pour faire disparaître non seulement des déchets radioactifs, mais aussi toutes sortes de déchets toxiques, dans des conditions invérifiables dans la pratique. Et l'on se trouverait en moins d'un siècle avec une croûte terrestre parsemée de trous soigneusement rebouchés, contenant des déchets extrêmement dangereux. Après la pollution de l'atmosphère et des océans, si difficile à endiguer et à réduire, l'homme s'attaque sérieusement au sous-sol. Or le

sous-sol est riche en matières premières et en ressources énergétiques, et c'est surtout le lieu de circulation et de stockage de l'eau, indispensable à la vie sur Terre.

De la même façon que des conventions internationales¹¹ tentent d'améliorer la situation de l'air et de l'eau, il n'est pas interdit de penser que les prochaines générations seront moins destructrices, et qu'une convention internationale verra bientôt le jour, interdisant le stockage en profondeur de tout déchet toxique ou radioactif, afin d'éviter l'irréversible. Le choix de faire ou ne pas faire un stockage profond est loin d'être seulement scientifique et technique ; c'est aussi un choix éthique, politique et citoyen.

DES SOLUTIONS TECHNIQUES

Trois pistes sont recommandées : la poursuite des recherches afin de réduire, en quantité et dans le temps, la nocivité des déchets radioactifs, la sécurisation des entreposages et stockages actuels, l'entreposage pérenne en subsurface¹².

La séparation-transmutation, une des trois voies de recherche de la loi de 1991, ne permettra pas de "régler" la question des déchets. Pour transmuter, il faut "sur-irradier" avec des neutrons, dont l'énergie dépend des éléments contenus dans les déchets. Il faudrait donc séparer complètement tous les déchets (techniquement à peu près impossible, et financièrement très élevé) et, en outre, cela ne les "supprimerait" pas mais diminuerait simplement la durée de vie d'une partie d'entre eux (de dix mille ans à quelques centaines d'années). La transmutation est encore étudiée par le Commissariat à l'énergie atomique (CEA), mais cela ne concerne pas la totalité. Selon un "Avis" de l'Autorité de sûreté nucléaire de juillet 2013, "les gains espérés de la transmutation des actinides mineurs en termes de sûreté, de radioprotection et de gestion des déchets n'apparaissent pas déterminants". Si la transmutation apparaît comme une voie de recherche décevante, il faut d'autant plus poursuivre les efforts en vue de réduire la nocivité des déchets radioactifs ; ce doit même être une priorité.

Le stockage en surface (considéré comme "définitif") existe déjà pour des déchets de faible activité (centres de stockage ANDRA de Soulaïnes, Morvilliers et de la Manche) et n'est pas sans poser de problèmes – il devrait être "contrôlé" pendant au moins trois cents ans, voire huit cents pour celui de la Manche, car il contient du plutonium.

11. Convention-cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques (adoptée en mai 1992, entrée en vigueur en 1994) ; Protocole de Montréal sur la protection de la couche d'ozone (signé en 1987, entré en vigueur en 1989) ; convention OSPAR pour la protection des milieux marins de l'Atlantique du Nord-Est (entrée en vigueur en 1998).

12. Entreposage réversible, réalisé dans des galeries souterraines, creusées sous quelques dizaines de mètres.

L'entreposage en surface (stockage temporaire) existe également pour les déchets de haute activité que sont les combustibles irradiés ou "usés" à la sortie du réacteur : ils sont tellement chauds et radioactifs qu'il faut les stocker pendant six mois au moins, et souvent plus (au moins deux ans et demi pour les combustibles MOX), dans des "piscines", vastes bassins profonds situés auprès des réacteurs et dans lesquels ils sont refroidis en permanence. Ces combustibles sont ensuite transportés à La Hague, où ils sont également entreposés dans une piscine qui est actuellement la plus grande concentration au monde de déchets radioactifs (un tonnage de combustibles usés équivalent au chargement de plus de cent réacteurs nucléaires). Ces piscines ne sont pas sécurisées vis-à-vis d'agressions extérieures graves (naturelles, terroristes ou militaires). La première urgence, et cela a été souligné par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), est donc leur sécurisation, en premier lieu à La Hague.

PAGE SUIVANTE EN HAUT
Veit Stratmann, *La Colline*,
phase 0, 2011.

EN BAS
Veit Stratmann, *La Colline*,
phase 9, 2011.

À l'heure actuelle, la solution qui paraît la moins mauvaise pour la gestion des déchets est le "stockage à sec en subsurface". En Allemagne et surtout aux États-Unis, pour les combustibles usés (ou combustibles irradiés), considérés comme des déchets puisqu'ils ne sont pas retraités comme en France (presque le seul pays à le faire à grande échelle), sont développés des entreposages de longue durée sur le site même des centrales nucléaires (ce qui évite les transports), à sec, après un séjour d'environ cinq ans dans les piscines de refroidissement situées auprès des réacteurs. Les assemblages de combustibles sont placés chacun dans des conteneurs métalliques de type "Castor" (utilisés aussi pour le transport des assemblages pour retraitement à La Hague) ou dans des conteneurs en béton. Il s'agit ainsi de stocker les combustibles irradiés des centrales, sans aucun retraitement, dans des galeries creusées à faible profondeur ou dans le flanc de montagnes granitiques. De la sorte, on facilite la surveillance et on garantit la possibilité d'extraire ces combustibles en cas d'une autre solution technique.

C'est la voie préconisée (avec quelques variantes) par la plupart des pays nucléarisés, et déjà mise en œuvre en Allemagne. Cette méthode peut s'appliquer également aux conteneurs (bien conditionnés) des déchets MA-VL existants, sachant que le meilleur entreposage de longue durée des verres HA est actuellement celui de La Hague.



QUE FAIRE DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE ?

Aucune solution satisfaisante n'a jusqu'ici été trouvée pour éliminer les déchets radioactifs ni même réduire les risques qu'ils présentent, jusqu'à des centaines de milliers d'années pour certains d'entre eux. Dès l'origine de la découverte de la possibilité d'utiliser l'énergie nucléaire par la fission des noyaux d'uranium 235, l'impossibilité de traiter la question des déchets aurait dû amener à renoncer à cette technique. Il n'en a rien été. Conscients de cette impasse, certains pays qui avaient développé cette utilisation y ont renoncé, et notamment deux des quatre principaux pays de l'Union européenne, l'Italie et l'Allemagne.

La même décision serait possible en France. À tout le moins, il est indispensable de diminuer la quantité de déchets radioactifs produits, et cela de trois façons complémentaires : réduire les consommations d'électricité, notamment pour les usages qui lui sont spécifiques (électroménager, audiovisuel, bureautique et informatique dans les secteurs résidentiel et tertiaire représentent environ la moitié de la consommation totale d'électricité) ; ne pas exporter d'électricité d'origine nucléaire (actuellement, la production est d'environ dix unités de 900 MW de puissance électrique), dont on garde en France les déchets nucléaires qui en résultent ; réduire la production d'origine nucléaire au profit de la production d'origine renouvelable (notamment éolien et solaire photovoltaïque). Il est en tout cas indispensable d'arrêter la production de plutonium par le retraitement des combustibles irradiés, car c'est une industrie à haut risque et polluante, tant au niveau de La Hague que de l'usine Melox de fabrication des combustibles MOX et des transports de plutonium. Sans parler du risque d'extension de la prolifération des armes nucléaires, l'une des raisons de la décision allemande.

La position de l'Allemagne a été clairement exposée par Wolfgang Renneberg, directeur général chargé de la sûreté nucléaire au ministère de l'Environnement de novembre 1998 à novembre 2009, dans un discours prononcé à Madrid le 24 mai 2001 : « Comme vous le savez tous, le gouvernement de l'Allemagne a décidé d'éliminer progressivement l'utilisation commerciale de l'énergie nucléaire. Je vais préciser quelques-unes des raisons les plus pertinentes qui fondent cette décision. La décision du gouvernement d'éliminer cette utilisation résulte d'une réévaluation des risques que présente cette technologie. Nous ne disons pas que les centrales électriques en Allemagne ne sont pas sûres au regard des standards internationaux.

Cependant, le gouvernement allemand est d'avis que l'ampleur des effets des accidents nucléaires possibles est telle que cette technique ne peut être justifiée, même si la probabilité d'un tel accident est faible. Une raison supplémentaire est qu'aucune solution pratique au problème de l'élimination finale des déchets hautement radioactifs n'a encore été trouvée. Les déchets radioactifs sont un fardeau pour les générations futures. L'arrêt définitif de la production d'électricité d'origine nucléaire supprime la production de nouveaux déchets. »

Cela était dit bien avant Fukushima.

Bernard Laponche a travaillé au Commissariat à l'énergie atomique (cea) dans les années 1960-1970 et a été pendant plusieurs années le représentant de la France au Comité Europe-Amérique de physique des réacteurs. Il a été responsable syndical à la cfdt dans les années 1970, directeur puis directeur général de l'Agence française pour la maîtrise de l'énergie (afme, aujourd'hui ademe) de 1982 à 1987, cofondateur avec Florence Rosenstiehl et directeur du bureau d'études ice (International Conseil Énergie) dans les années 1990, et conseiller technique de Dominique Voynet pour l'énergie et la sûreté nucléaire en 1998-1999. Il a poursuivi de 2000 à 2012 une activité de consultant international dans le domaine de la maîtrise de l'énergie, et a été président du comité directeur du projet "EE 21" (Efficacité énergétique 21) de la Commission économique pour l'Europe des Nations-Unies (unece). Il est cofondateur et membre des associations Global Chance et Énergie partagée. Il a fait partie du groupe des experts du Débat national sur la transition énergétique de 2013.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Benjamin Dessus, *Déchiffrer l'énergie*, Paris, Belin, 2014.

Benjamin Dessus et Bernard Laponche, *En finir avec le nucléaire. Pourquoi et comment*, Paris, Le Seuil, 2011.

Mary Byrd Davis, *La France nucléaire, matières et sites*, Paris, Wise, 1997, nouv. éd. 2002.

Mykle Schneider et Anthony Froggatt, *The World Nuclear Industry Status Report 2015* [en ligne] (URL : <http://www.worldnuclearreport.org/-2015-.html>).

"Le casse-tête des matières et déchets nucléaires", *Les Cahiers de Global Chance*, n° 34, novembre 2013 [en ligne] (URL : www.global-chance.org).

ANDRA, *Inventaire national des déchets radioactifs 2015* [en ligne] (URL : <http://www.andra.fr/download/site-principal/document/editions/558.pdf>)

SITES INTERNET

ACRO (Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'ouest) : www.acro.eu.org

CRIIRAD (Commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité) : www.criirad.org

Global Chance : www.global-chance.org

GSIEN (Groupement des scientifiques pour l'information sur l'énergie nucléaire) : gazettenucleaire.org/GSIEN.html

IPFM (International Panel on Fissile Materials) : www.fissilematerials.org