

Matières et déchets de la production d'électricité d'origine nucléaire

BENJAMIN DESSUS, ANDRÉ GUILLEMETTE, BERNARD LAPONCHE
ET JEAN-CLAUDE ZERBIB

RÉSUMÉ – En France, contrairement aux autres pays qui les gardent en l'état, la plus grande partie des combustibles usés retirés des réacteurs nucléaires sont «retraités». On accumule ainsi une très grande variété de types de déchets, classés selon leur degré de radioactivité et leur durée de vie et répartis en deux grandes catégories : les «matières valorisables», uranium et plutonium (dont certaines sont valorisées), et les «déchets radioactifs», considérés comme non utilisables. La production de ces déchets très dangereux à très longue période met en cause l'utilisation même de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité et constitue pour beaucoup une raison suffisante pour abandonner cette technique. Pour les déchets existants, la solution alternative à la méthode risquée du stockage en profondeur serait, d'une part, l'entreposage pérenne à sec et en subsurface des combustibles irradiés et autres déchets, et, d'autre part, l'amplification des recherches scientifiques pour la réduction de la durée de vie et de la nocivité des déchets.

MOTS CLÉS – Électronucléaire, déchets nucléaires, radioactivité, Cigéo, politique énergétique.

ABSTRACT – In most countries, spent nuclear fuel is directly stored in pools and constitute the bulk of highly radioactive waste. In France, reprocessing separates spent fuel into three categories: uranium, plutonium, minor actinides and fission products. Hence, a vast amount of very diverse radioactive materials are stored in various sites and conditions, under two denominations: "nuclear materials" (which can be or are partly recycled) and "radioactive waste" which should be permanently disposed of. The production of highly radioactive and long-lived waste raise legitimate questions on the use of nuclear energy for power production and many people think that it's a sufficient reason for giving up this technique. Concerning existing radioactive waste, the alternative to deep disposal should be: a) dry storage of spent fuel and other existing waste in protected sites (bunkers or hills), and b) more active research on the possibilities to reduce both radioactivity and the lifetime of radioactive waste.

KEYWORDS – Electronuclear, radioactive waste, radioactivity, Cigéo, energy policy.

Électronucléaire : production de chaleur, d'électricité et de déchets nucléaires

Fission et réaction en chaîne produisent de la chaleur

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 la fission des noyaux d'uranium 235 contenus dans le combustible (des « crayons » d'uranium ou d'oxyde d'uranium, UO_2). Il s'y ajoute les fissions du plutonium 239, qui est produit à partir de l'uranium 238 par des réactions nucléaires autres que la fission (la capture neutronique).

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. Les noyaux des isotopes de nombreux éléments ainsi formés sont instables et par conséquent fortement radioactifs, émettant des rayonnements qui produisent à leur tour un échauffement du combustible.

Dans les réacteurs qui équipent presque toutes les centrales nucléaires au monde, la chaleur du combustible est évacuée par de l'eau (réacteurs à eau sous pression ou pressurisée, REP, ou PWR en anglais) ou par la vapeur produite par l'ébullition de l'eau (réacteurs à eau bouillante, REB, ou BWR en anglais). L'entretien de la réaction en chaîne dans le réacteur permet de chauffer l'eau ou de la faire bouillir sous une pression suffisante pour produire de la vapeur permettant ensuite de produire de l'électricité.

Tous les réacteurs équipant les centrales nucléaires françaises sont de la filière REP (voir annexe). Une « tranche » d'une centrale nucléaire est constituée d'un ensemble « réacteur-turboalternateur ». Le réacteur lui-même est constitué de l'ensemble des combustibles (le cœur) et de l'eau qui joue à la fois le rôle de modérateur (ralentisseur de neutrons) et de fluide caloporteur (refroidisseur).

Le caractère récent de la découverte de la fission et de la réaction en chaîne et l'aura scientifique qui l'entoure masquent pour beaucoup la réalité de son utilisation dans les centrales nucléaires : il s'agit de chauffer de l'eau sous une pression suffisante ou de la faire bouillir afin de produire de la vapeur, produisant à son tour de l'électricité grâce à un turboalternateur, comme dans une chaudière à charbon. Les températures atteintes sont d'ailleurs relativement basses : eau et vapeur à 300 °C dans un réacteur à eau bouillante ou eau à 320 °C dans un réacteur à eau pressurisée, ce qui explique le rendement assez faible des centrales nucléaires (environ 33 %).

Et des produits radioactifs

À l'intérieur des éléments combustibles, les produits de fission instables se transforment par désintégration en émettant des rayonnements dangereux. Les transuraniens, *des éléments, tels que le plutonium*, dont le nombre de masse (total des neutrons et des protons contenus dans le noyau) est supérieur à celui de l'uranium *et qui sont* produits par captures de neutrons dans le réacteur, sont également radioactifs.

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 1 000 environ après dix demi-vies. La durée de vie d'un déchet radioactif dépend ainsi de la période des différents éléments radioactifs qu'il contient.

Les demi-vies s'échelonnent de quelques fractions de seconde à quelques dizaines de milliers d'années : par exemple, celle du césium 137 est de trente ans, celle de l'iode 131 de huit jours et celle du plutonium 239 de 24 000 ans. Tous les isotopes du plutonium sont radioactifs et le plutonium produit dans les réacteurs nucléaires est très dangereux.

La plus ou moins grande concentration des matières radioactives dans les déchets 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 (soit des becquerels par gramme, Bq/g). Cette unité est très petite et on utilise couramment ses multiples, dont le térabecquerel (TBq, soit 10^{12} Bq ou mille milliards de becquerels).

La radioactivité émise peut de plus être de différentes natures : les rayonnements dits « alpha » (noyau de deux protons et deux neutrons), « bêta » (électron) et « gamma » (photon) aux effets très différents du fait de masses, de niveaux d'énergie et de pouvoirs de pénétration très distincts.

La « radioactivité » ne se limite donc pas à l'activité (intensité de la source) mais inclut tous les paramètres physiques qui en constituent la source.

En cédant de l'énergie à une quantité de matière, on délivre une dose de rayonnement physiquement mesurable. Si cette dose est délivrée à une personne, il est possible d'évaluer l'effet biologique néfaste de cette dose 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 de rayonnement (alpha, bêta, gamma, X, neutron). 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.

Dans les combustibles irradiés, à la sortie du réacteur, se trouvent et sont produits des émetteurs alpha. 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 notamment dans le foie et les surfaces osseuses. En termes de radioprotection, la limite de dose annuelle induite par une activité nucléaire est, pour le public, de 1 millisievert par an, ce qui correspond à une inhalation d'environ 1/100 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, des oxydes de plutonium.

Du combustible neuf au combustible irradié

Le cœur du réacteur d'une tranche nucléaire d'une puissance électrique de 900 mégawatts (MW) utilise chaque année¹, pour du combustible à l'uranium « standard » (tel que prévu à la conception), l'équivalent de 18,5 t d'uranium, dont 685 kg d'isotope fissile 235. Après utilisation de ce combustible avec un taux de combustion de 33 gigawatts-jour par tonne (GWj/t)², le combustible usé contiendra 17,68 t d'uranium.

Les 820 kg d'uranium « consommés » (pour moitié uranium 235 et uranium 238³) se sont transformés, d'une part, en produits plus lourds et plus radioactifs, dont 164 kg de plutonium et 14,1 kg d'actinides mineurs, des éléments radioactifs à très longue durée de vie, et, d'autre part, en 644 kg de produits de fission, dont 31,3 kg de strontium 90 et de césium 137. La transformation porte sur moins de 5 % de la masse, mais les conséquences radiologiques sont fondamentales : le combustible déchargé est considérablement plus radioactif que le combustible neuf. Si une large part de cette radioactivité disparaît en quelques jours à quelques semaines, la radioactivité du combustible usé reste à plus long terme plus d'un million de fois plus élevée que celle du combustible neuf⁴.

Les matières radioactives contenues dans le combustible irradié s'échappent en plus ou moins grande quantité lors d'une situation accidentelle en fonction de leurs caractéristiques physiques (du gaz léger aux particules lourdes) et des circonstances de l'accident. Lors de l'accident de Tchernobyl, on estime qu'une fraction du cœur a été relâchée, de quelques pour cent dans le cas du plutonium, de 60 % des iodes (qui provoquent des milliers de cancers de la thyroïde) et jusqu'à 100 % dans le cas des gaz rares. Environ 30 % du césium 137, par exemple, s'est échappé, soit de l'ordre de 26 kg, représentant selon les estimations près de 75 % de la dose collective reçue par la population à la suite de l'accident.

Le seuil d'apparition d'un cancer du poumon correspond à l'inhalation d'environ 200 000 Bq de plutonium 239, sous la forme de dioxyde de plutonium

1. En période de croisière, le rechargement du combustible (oxyde d'uranium enrichi à 3,7 %) d'un réacteur de 900 MW se fait par quart de cœur.

2. Cette unité de mesure désigne la quantité d'énergie (thermique) fournie par une tonne de combustible durant son séjour dans le réacteur.

3. L'uranium 238 participe à 43 % des fissions sur la durée d'utilisation du combustible : 8 % par fission directe (spontanée) et 35 % par formation du plutonium et fission de celui-ci.

4. Calcul basé sur l'uranium d'une part, le plutonium d'autre part, et sur les principaux éléments contribuant à la radioactivité à moyen terme, notamment le césium 137 et le strontium 90. La radioactivité d'un cœur neuf d'uranium peut être estimée à 0,3 TBq, celle de la même quantité de combustible après irradiation se compte en dizaines d'exabecquerels (EBq, ou milliards de milliards de becquerels, 10¹⁸ Bq), soit des dizaines de millions de fois plus radioactif.

(PuO₂). Avec une activité spécifique de $2,3 \cdot 10^9$ Bq/g (2 300 Bq/μg), cette activité correspond à 87 μg de plutonium 239.

Retraitement, plutonium, MOX

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 contiennent⁵. La solution adoptée dans la majorité des pays équipés de centrales nucléaires (États-Unis, Allemagne, Suède, Corée du Sud...) est de garder les combustibles irradiés 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. En France (la Hague) et au Royaume-Uni (Sellafield), par contre, le plutonium est extrait des combustibles irradiés dans une usine dite de « retraitement », aujourd'hui essentiellement à partir des combustibles [des centrales existant sur le territoire national](#), mais aussi, dans le passé, à partir des combustibles « étrangers » (Allemagne, Belgique, Italie, Japon⁶, 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 », également développée avec de l'uranium 235 obtenu par « enrichissement » 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 France.

En parallèle à cette utilisation, un nouveau combustible a été imaginé pour se substituer au combustible classique à uranium enrichi en uranium 235 (3,7 % contre 0,71 % dans l'uranium naturel) dans les réacteurs à eau ordinaire et uranium enrichi (PWR et BWR). Ce nouveau combustible, appelé MOX⁷ (*Mixed OXyde*, oxyde mixte d'uranium et de plutonium : UO₂-PuO₂), contient de l'uranium appauvri en uranium 235 et en moyenne 7 % de plutonium (5 à 12,5 %

5. La part de chaque famille de produits dépend beaucoup du temps de refroidissement. Au bout de trois ans, les produits de fission représentent 4 130 W/t et les actinides 527 W/t, dont 242 W/t pour le curium 244 et 218 W/t pour le plutonium. Ces chiffres montrent le poids des actinides mineurs, de grandes périodes, dans le stockage.

6. Après le démarrage d'une usine de retraitement pilote d'une capacité de 100 t/an en 1977, le Japon a entamé en 1993 la construction d'une usine de retraitement d'une capacité de 800 t/an (Rokkasho Mura). Cette construction a connu de nombreux retards et son coût a été multiplié par plus de trois (de 8 à 29 milliards de dollars). Les premiers tests de retraitement ont démarré en avril 2006, mais de nombreux problèmes techniques sont apparus et le démarrage est toujours retardé.

7. 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.

suivant la position dans le cœur)⁸. 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 t à la fin de l'année 2012, dont 37,8 t appartiennent à la France). **Au 31 décembre** 2012, la France disposait d'un total de 52,5 t de plutonium (la Hague, usine Melox de fabrication du combustible MOX à Marcoule, combustible MOX neuf entreposé dans les réacteurs EDF).

Les combustibles MOX neufs et usés sont beaucoup plus chauds que les combustibles UO₂ classiques. L'entreposage en piscine des combustibles MOX usés nécessite une compensation pour l'évaporation plus importante que celle des piscines qui contiennent des combustibles UO₂. Enfin, le temps de séjour en piscine ou en entreposage à sec des combustibles MOX usés est beaucoup plus long que celui des combustibles UO₂ et ces combustibles ne sont pas retraités (il reste en fin de vie du combustible environ 6,7 % de plutonium pour un MOX neuf à 8,65 %). On estime généralement qu'il faut entreposer soixante ans un combustible irradié à base d'uranium avant stockage définitif **et que cette durée passe à cent cinquante ans pour** un combustible MOX irradié. Durant l'entreposage sous eau, les piscines doivent être refroidies en permanence par des échangeurs.

Matières et déchets nucléaires

Déchets et « matières valorisables »

Quand on parle de « déchets nucléaires » aujourd'hui pour aborder leur gestion à court et moyen terme (entreposage ou stockage éventuel), on est confronté à un piège sémantique majeur. Le terme de « déchet radioactif » est en effet réservé, par analogie avec les déchets les plus ordinaires, à des substances radioactives sans réutilisation prévue. Plus précisément, la loi de 2006 définit les déchets radioactifs comme ceux pour lesquels aucune utilisation n'est prévue ou envisagée.

La catégorie « déchets nucléaires » se définit 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.

8. La teneur moyenne en plutonium est égale à 7,08 % pour un cœur chargé à 30 % par du MOX, avec un renouvellement par tiers de cœur. Cette teneur moyenne passe à 8,65 % pour un renouvellement par quart de cœur. Elle devrait passer à 9,5 %. La teneur maximale d'un assemblage est de 12 %.

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.

En dehors de la matière première de l'industrie nucléaire, l'uranium, les différentes matières qui sont 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 pour 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 donc s'en protéger assez facilement (par exemple par des écrans de faible épaisseur), ils deviennent très dangereux pour l'homme par inhalation ou ingestion. Ils dissipent également beaucoup d'énergie (émission alpha).

Quelle que soit l'appellation, déchet ou matière valorisable, le retraitement des combustibles usés sépare en trois familles les matières radioactives qu'ils contiennent, mais la nature et la quantité des matières reste constante dans tous les cas (sauf en cas de transmutation). Et quelles que soient les méthodes pour les gérer, on retrouve toujours les mêmes quantités des différentes matières nucléaires.

Caractérisation des matières et déchets nucléaires

Les différents types de déchets sont regroupés en grandes catégories, principalement basées sur 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* : 100 jours et 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 10^2 Bq/g) ; faible activité (FA : entre 10^2 et 10^5 Bq/g) ; moyenne activité (MA : entre 10^5 et 10^8 Bq/g) ; haute activité (HA : plus de 10^8 Bq/g).

Tableau 1 – Principales catégories de déchets radioactifs en France

Demi-vie	Vie très courte (VTC)	Vie courte (VC)	Vie longue (VL)
Très faible activité (TFA)	1. Déchets VTC Essentiellement issus des activités médicales ou industrielles non nucléaires.	Essentiellement gravats et ferrailles, issus du démantèlement et déchets industriels spéciaux.	2. Déchets TFA Résidus miniers du traitement de l'uranium, uranium du retraitement, uranium appauvri.
Faible activité (FA)		3. Déchets FMA-VC Issus de l'exploitation, de la maintenance et du démantèlement des installations industrielles et de recherche du nucléaire.	4. Déchets FA-VL Déchets de procédés d'assainissement ou de démantèlement, notamment graphite irradié et déchets radifères.
Moyenne activité (MA)			5. Déchets MA-VL Structures de combustibles et déchets du retraitement (gainés, boues, bitumes...).
Haute activité (HA)		6. Déchets HA Combustibles usés en l'état ou, dans le cas du retraitement, déchets vitrifiés et plutonium.	

Inventaire national des déchets radioactifs de l'Andra

La loi concernant les recherches sur la gestion des déchets radioactifs de 1991 a confié à l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) une mission d'inventaire des déchets radioactifs français, renouvelée et élargie aux entreposages de matières radioactives valorisables dans la loi de 2006. L'édition 2012 de l'inventaire national présente des données arrêtées à la fin de l'année 2010.

L'inventaire national établi par l'Andra présente à la fois un recensement des sites abritant des déchets radioactifs, quelles que soient leur quantité et leur nature, et une classification technique des catégories de déchets, en fonction de leur radioactivité et de leur durée de vie, de leur origine et de leurs caractéristiques. Il fournit des évaluations des quantités existantes et des projections sur les quantités à venir. L'inventaire inclut, outre l'ensemble des déchets reconnus comme tels, une évaluation plus grossière des quantités de matières dites valorisables, c'est-à-dire contenant sous différentes formes de l'uranium ou du plutonium jugé réutilisable en réacteur.

L'inventaire [publié en 2012](#) recense 1 121 sites où sont entreposés ou stockés des déchets radioactifs à la fin de l'année 2010, dont trente seulement sont des sites dédiés à l'entreposage de déchets radioactifs et trois des centres de stockage (auxquels s'ajoutent vingt-trois « sites de stockage historiques »

correspondant aux stockages réalisés dans le périmètre de certaines installations avant la mise en place d'une réglementation). Ces sites contiennent des déchets très variés qui, selon l'inventaire, constituent plus de cent familles de déchets différentes.

L'inventaire fournit une évaluation détaillée, famille par famille, des quantités de déchets existants, en distinguant les productions historiques et les productions en cours, avec des hypothèses sur leur poursuite. Il décrit pour chaque famille ainsi prise en compte son conditionnement actuel et, s'il doit être différent, son conditionnement futur. Les volumes attendus en conditionnement final servent ensuite de base à une estimation plus globale des stocks existants et à des projections associées à la poursuite de l'exploitation des installations existantes.

Bien que l'inventaire regroupe l'ensemble des déchets, toutes origines confondues, ceux-ci proviennent essentiellement du secteur nucléaire, et en premier lieu de la production électronucléaire. Les autres activités nucléaires, la recherche et la défense, représentent la plus grande part restante.

Tableau 2 – Répartition par secteur économique des déchets radioactifs existant à la fin de l'année 2010

Secteur	Électronucléaire	Recherche	Défense	Industrie non nucléaire	Médical
Part (%)	59,5 %	25,8 %	10,7 %	3,4 %	0,7 %

Tableau 3 – Volumes des déchets existant à la fin de l'année 2010

Catégorie	HA	MA-VL	FA-VL	FMA-VC	TFA	DSF**	TOTAL
Volume*	2 700	40 000	87 000	830 000	360 000	3 600	Env. 1 320 000

* En m³ équivalent conditionné.

** Les DSF sont les «déchets sans filière», ceux qui n'entrent pour le moment dans aucune des filières existantes ou à l'étude, en raison notamment de leurs caractéristiques chimiques et physiques. Les études concernant ces déchets sont en cours.

Tableau 4 – Part en volume et niveau de radioactivité des déchets radioactifs existant à la fin de l'année 2010

Catégorie de déchets	Volume de déchets (en %)	Niveau de radioactivité (en %)
HA	0,2	96
MA-VL	3,0	4
FA-VL	6,6	0,01
FMA-VC	62,9	0,02
TFA	27,3	Moins de 0,01

Combustibles usés, matières nucléaires et déchets

Combustibles usés et matières nucléaires

Le tableau suivant dresse un état des lieux à la fin de l'année 2010. Il y avait à cette date un total 18 914 t de combustibles usés ou en charge dans le cœur des réacteurs d'EDF, au Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et dans la propulsion navale militaire.

Tableau 5 – Combustibles usés et matières issues du retraitement des combustibles irradiés à la fin de l'année 2010 (en tonnes de métal lourd)

Matières	
En cours d'utilisation dans les réacteurs EDF	
- Combustibles UOX	4477
- Combustibles MOX	299
- Combustibles URE	156
Tonnage total en cours d'utilisation	4932
Combustibles usés entreposés en piscines	
- Combustibles UOX	12006
- Combustibles MOX	1287
- Combustibles URE	318
- Des réacteurs civils de recherche (dont Phénix, 45 t)	53
- Du réacteur Superphénix (sur le site de Creys-Malville)	104
- Des réacteurs de recherche	53
- Des réacteurs de la propulsion navale	146
Tonnage total des combustibles usés	13982
Matières « valorisables »	
- Uranium issu après traitement de combustibles usés	24 100
- Plutonium issu après traitement de combustibles usés*	80
- Uranium appauvri issu de l'enrichissement	271 481

* 60 t sont entreposées à la Hague à la fin de l'année 2010 (dont 37,7 t appartiennent à la France), 8 t sont en cours de fabrication de combustible MOX, 10 t sont dans les MOX neufs et 2 t sont entreposées dans diverses installations du CEA. À la fin de l'année 2011, il y avait 57 t entreposées (dont 36,2 t pour la France) et 56 t (dont 37,8 t pour la France) à la fin de l'année 2012.

Volumes de déchets du retraitement accumulés à la fin de l'année 2010

Les deux principaux types de déchets produits par le retraitement sont : a) les déchets de haute activité (HA), qui comprennent les « colis standard de déchets vitrifiés » (CSD-V) à la Hague et à Marcoule, et les « déchets compactés » (CSD-C) qui renferment les coques et embouts de combustible PWR retraités à la Hague ; b) les déchets de moyenne activité renfermant des radio-nucléides à vie longue (MA-VL).

L'entreprise Areva fournit, dans ses rapports sur le retraitement des combustibles étrangers, les volumes de déchets vitrifiés et de déchets compactés

dans les ateliers des usines de la Hague, en précisant la part qui revient à la France.

Tableau 6 – Cumul en 2012 des déchets vitrifiés et compactés, réalisés à la Hague par Areva

	Nombre de colis	Part française de colis	Volume France (m ³)
CSD-V (déchets vitrifiés)	11 665	97,8 %	2 053
CSD-C (déchets compactés)	11 941	57,4 %	1 234

Le volume unitaire des colis est de 0,18 m³.

CSD-V : colis standard de déchets vitrifiés. CSD-C : colis standard de déchets compactés.

Source : rapports d'Areva de 2007 à 2012.

La gestion des déchets radioactifs

Les déchets de faible et moyenne activité à vies courtes

À ce jour, la France compte trois centres de stockage exploités par l'Andra, qui concernent les déchets représentant les plus gros volumes (hors déchets miniers) mais également contenant le moins de radioactivité :

- Le Centre de stockage de la Manche (CSM), qui 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, le CSM est entré depuis janvier 2003 dans une phase de surveillance⁹.

- Le Centre de stockage de l'Aube (CSA), à Soulaines, qui, à la fin de l'année 2012, contenait, selon l'Andra, 289 554 m³ de déchets du même type que le CSM, pour une capacité de 1 000 000 m³. Exploité depuis janvier 1992, le CSA est prévu pour fonctionner pendant une soixantaine d'années et accueillir l'ensemble des déchets FMA-VC associés au parc nucléaire actuel.

- Le Centre de stockage TFA de l'Aube (ou Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage, CIRES), à Morvilliers, qui, à la fin de l'année 2012, contenait, selon l'Andra, 227 449 m³ de déchets de très faible activité (TFA) principalement issus du démantèlement (le rapport donne une liste plus large des secteurs concernés). Ouvert depuis 2003, le centre 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.

En dépit de l'existence de ces centres de stockage, une part non négligeable des déchets relevant de ces catégories reste entreposée sur différents sites de l'industrie nucléaire en attente d'une solution : il s'agit de déchets, en général

9. Dans une étude consacrée à l'état du CSM et son évolution, l'Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'Ouest (ACRO) a dressé en 2009 le bilan des problèmes posés par l'inventaire ou les relâchements de radioactivité du site, soulignant que « l'empirisme qui a guidé l'édification de ce centre suscite déjà de nombreuses inquiétudes qui devraient s'aggraver dans l'avenir ».

anciens, qui ne présentent pas un conditionnement adapté aux exigences techniques d'acceptation dans ces centres.

Les déchets de haute et moyenne activité à vie longue

Dès les années 1980, l'industrie nucléaire et la puissance publique se sont orientées vers l'idée d'un stockage géologique en profondeur des déchets les plus dangereux et ont décidé de lancer des recherches sur l'identification et la validation de sites favorables dans différents types de formations rocheuses sur le territoire national. Mais face aux oppositions très fortes des populations locales, ces recherches ont été suspendues en 1989.

C'est la loi de 1991¹⁰ qui a fixé les trois axes d'un programme de recherche sur la gestion des déchets radioactifs : séparation et transmutation des éléments radioactifs à vie longue ; stockage réversible ou irréversible dans des formations géologiques profondes ; et entreposage de longue durée en surface de ces déchets. Elle a créé l'Andra, un établissement public industriel et commercial indépendant, jusque-là simple département du CEA.

L'application de la loi de 1991 s'est révélée beaucoup plus difficile que prévu. La plus grave lacune, car elle atteint la légitimité même du processus, a été l'impossibilité pour les pouvoirs publics d'implanter plus d'un laboratoire de recherche souterrain, alors que la loi en prévoyait explicitement plusieurs. Après la désignation d'un site en argile à Bure, aux confins des départements de la Meuse et de la Haute-Marne, et l'abandon du second site envisagé dans la Gard, l'échec de la « mission granite » de concertation a consacré 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 public, non pas, comme elle en avait l'habitude, à un projet industriel concret de gestion des déchets nucléaires, mais bien plus globalement à une question générique, celle du devenir des déchets nucléaires. Il fallait en effet préparer les éléments d'une loi qui fixerait le cap à moyen et long terme pour la France en termes de gestion des déchets radioactifs.

Très vite, ce débat public a mis à jour l'ambiguïté des termes utilisés et a montré qu'il fallait élargir la problématique à l'ensemble des matières nucléaires dangereuses, tant la notion de « déchets ultimes » paraissait inadéquate et réductrice.

Quant aux déchets considérés aujourd'hui comme « ultimes » (les déchets MA-VL et HA-VL), ils étaient l'objet de recherches intenses de la part du CEA pour en assurer à terme le recyclage : ils perdraient alors leur statut particulier. En attendant, il n'était plus question de les mettre dans une piscine de quelques

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

milliers de mètres cubes (la fameuse « piscine olympique »), mais bien de creuser des dizaines de kilomètres de galeries souterraines à grande profondeur pour les y enfouir.

Il devenait donc indispensable de disposer d'une vue d'ensemble sur les matières nucléaires dangereuses et leur gestion, tant leur statut pouvait changer en fonction des stratégies techniques et des scénarios énergétiques à court ou moyen terme et tant les chiffres qui les concernaient apparaissaient comme fantaisistes.

Outre ce travail essentiel de clarification, le débat public 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 dans une couche géologique profonde (études confiées à l'Andra), un nouveau concept a été proposé, celui d'« entreposage pérenne ».

La loi de juin 2006¹¹ qui a suivi ce débat 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 « déchets radioactifs » continue à être limité à des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou « envisagée ». Par ailleurs, le « stockage en couche géologique profonde » y est réaffirmé comme solution de référence, assorti de l'adjectif « réversible », sans que dans la loi ne soit défini précisément ce principe de réversibilité. Enfin, le terme « entreposage » reste réservé à des opérations de nature temporaire. La loi prévoit qu'un débat public sur l'installation de stockage géologique sera organisé.

On voit que seules deux des six grandes catégories de déchets sont rigoureusement concernées par les recherches menées dans le cadre des lois de 1991 et de 2006 : les déchets « moyenne activité » à vie longue et les déchets « haute activité » à vie longue (MA-VL et HA-VL). Limiter la réflexion à ces seules catégories est pourtant très réducteur : d'une part, ce ne sont pas les seules catégories pour lesquelles les solutions de gestion restent à ce jour à l'étude ; d'autre part, les options envisageables pour gérer les déchets les plus problématiques ont des répercussions importantes sur les autres catégories.

Le projet Cigéo¹²

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 d'un centre de stockage géologique réversible des déchets nucléaires appelé Cigéo (Centre industriel de stockage géologique). Conformément à la loi, ce projet a fait l'objet d'un débat

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

12. Cette section s'appuie sur l'article de B. Thuillier, « CIGEO, une faisabilité en question », *Les cahiers de Global Chance*, n° 34, novembre 2013, p. 59-66.

public en 2013 sous l'égide de la CNDP. D'importantes controverses ont alors été soulevées portant à la fois sur la consultation citoyenne, sur la pertinence du stockage en profondeur dans la croûte terrestre et sur la sûreté, le coût et la fiabilité à long terme du Cigéo. Ce débat a été complété par une conférence de citoyens organisée de décembre 2013 à février 2014.

D'après le projet présenté par l'Andra, [il s'agirait de construire](#) à partir de 2019 une centaine de kilomètres de galeries, sur une surface souterraine de l'ordre d'une quinzaine de kilomètres carrés. Cette structure nécessiterait alors l'extraction de 7 à 8 millions de m³ de terre ou roche, [l'excavation de 550 000 m³](#) de terre par an, [le transport de 825 000 m³](#) de terre en raison du foisonnement (décompression de la terre excavée) et [la fabrication de 275 000 m³](#) de béton.

Trois types de déchets seraient stockés : *a)* les déchets dits «MA-VL», 70 000 m³ en volume non conditionnés, mais 350 000 m³ en colis conditionnés ou 171 530 colis, dont 74 370 colis d'enrobés bitumineux ; *b)* les déchets dits «HA-VL», 10 000 m³ en volume non conditionnés, mais 30 000 m³ en colis conditionnés ou 60 000 colis ; *c)* des combustibles usés, non compris dans les inventaires actuels du Cigéo, mais qui pourraient constituer 90 000 m³ en colis conditionnés ou 57 000 assemblages selon les études de 2005. Ces valeurs concernent les déchets produits par le parc existant de réacteurs nucléaires, supposés fonctionner pendant cinquante ans. On suppose également la poursuite du retraitement (1 000 t par an) de tous les combustibles déchargés¹³.

Ces colis seraient acheminés dès la première décennie d'exploitation à partir de 2025 au rythme annuel de 700 à 1 000 emballages, soit 1 000 arrivées et 1 000 départs, soit 100 convois de 10 wagons environ par an pendant toute la durée de l'exploitation (cent à cent vingt ans), soit plus de 100 000 wagons.

En ce qui concerne les installations de surface, deux types de zones sont à distinguer : *a)* une zone dite «Descenderie» de 110 ha environ qui rassemble le terminal ferroviaire de réception des colis, des structures de réception, de contrôle, de conditionnement des colis, un entreposage tampon des colis en attente, une unité de fabrication des conteneurs, ainsi que les entrées des deux descenderies (colis et service) ; une partie dite «de verse», de l'ordre de 130 ha, sera complémentaire à cette zone où sera déposée toute la terre excavée ; *b)* une zone dite «Puits», de 200 ha environ, est prévue pour regrouper les quatre puits de la structure : un pour les travaux, un pour le personnel et les deux puits de sortie d'air.

En ce qui concerne les installations souterraines, deux types d'alvéoles sont prévues en fonction des déchets à stocker : *a)* des alvéoles dites «HA-VL» horizontales reliées par des galeries d'accès, d'une longueur d'environ 100 m, constituées de tubes d'acier en tronçons non soudés emboîtés, d'environ 70 cm de diamètre ; ces structures tubulaires permettront le passage et le stockage par

13. L'Andra a également étudié une situation de «non-renouvellement de la production électronucléaire», avec un arrêt des réacteurs à quarante ans : il y aurait alors 52 000 t de combustibles usés déchargés des réacteurs, dont 28 000 t non retraitées qui devraient être stockées en l'état. Les volumes de déchets seraient : 35 000 m³ de vitrifiés HA-VL, 59 000 m³ de MA-VL et 165 000 m³ de FA-VL.

poussage des colis HA-VL jusqu'au fond de ces alvéoles ; *b*) des alvéoles dites « MA-VL » de 6 à 9 m de diamètre d'une longueur de 375 à 525 m, ventilées avec des retours d'air vers les galeries de liaison ; ces sortes de tunnels, équipés de systèmes de manutention sur rails, permettront le stockage de différentes formes parallélépipédiques de colis en béton.

Risques du Cigéo pendant toute la durée de son exploitation

À travers l'analyse des trois grands accidents de réacteurs nucléaires, encore très partielle dans le cas de Fukushima, on se rend compte que l'évaluation par les concepteurs des risques encourus privilégie de distinguer les situations d'anomalies ou de défaillances, de les évaluer séparément et à des niveaux envisageables. Cette évaluation est déjà extrêmement difficile ; elle repose sur des modèles de calcul complexes dont les paramètres sont ajustés sur des expériences limitées et sur le « retour d'expérience » des incidents et accidents. On comprend alors combien la juxtaposition, parfois fortuite, de ces situations de défaillances (erreur de conception, usure des matériaux, des équipements et des appareils) et d'agressions externes dans des systèmes complexes peut relever de l'impossible (d'où l'expression aujourd'hui à la mode : « il faut imaginer l'inimaginable »). S'y ajoutent les erreurs humaines, inévitables pendant une période de cent ans et dont certaines peuvent avoir de graves conséquences (par exemple des erreurs dans l'acceptation pour stockage profond des colis après leur livraison sur le site : qu'un « mauvais colis », émetteur d'une forte quantité d'hydrogène, soit enfoui, avec risque d'explosion).

Trois types de problèmes de sûreté ont été identifiés dans la phase d'exploitation : *a*) 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 datant de 2012), ainsi que les critères de leur acceptation pour le stockage au sein du Cigéo ; il existe en particulier de très fortes interrogations sur les déchets bitumés¹⁴, à cause du risque d'incendie, et sur les déchets qui émettent de l'hydrogène (quelquefois ce sont les mêmes) ; *b*) les risques liés à la production d'hydrogène (inflammation, explosion), nécessitant une ventilation puissante assurée en permanence avec une limite d'une dizaine de jours maximum pour son indisponibilité (ce qui paraît pouvoir arriver sur une période d'au moins cent ans) ; *c*) le risque d'incendie (présence de batteries, de bitume, d'hydrogène), avec accélération possible du feu par la ventilation. Par ailleurs, 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

14. Les déchets bitumés ont une très forte charge radioactive alpha et ils produisent des gaz radioactifs (les déchets bitumés à Marcoule seraient totalement à reconditionner pour être même transportés). Ces déchets produisent surtout de l'hydrogène. Le bitume, substance extraite du pétrole, est un produit hydrocarboné semi-solide qui est détruit sous rayonnement (radiolyse) et libère de ce fait l'hydrogène.

par exemple en conclure que l'on ne doit pas accepter des déchets bitumés ou des déchets produisant de l'hydrogène.

Évidemment, tous ces risques ont été sérieusement étudiés séparément par le maître d'œuvre. Mais imaginons – n'oublions pas que l'on raisonne sur une période de plus de cent ans – que tous ces paramètres, ou une partie d'entre eux, se mettent à l'orange. Un accident, une zone non ventilée, une goutte d'huile sur un moteur (flamme), une batterie défectueuse (étincelle), un début d'incendie d'un engin, des colis bitumineux sur l'engin, des fumées, une élévation de température, l'empêchement, par conséquent, d'intervenir vite, une décision malheureuse en réaction et alors on se trouve dans des situations incontrôlables : *si l'intervention est trop tardive*, les galeries *seront trop dégradées* pour être accessibles aisément ; *s'il n'y a pas assez d'eau*, l'incendie se développera ; *s'il y en a trop*, on *augmentera* le risque de criticité ; *s'il y a trop de ventilation*, pour éliminer les fumées, le feu s'étendra ; *si la ventilation s'arrête*, l'hydrogène s'accumulera et le risque d'explosion augmentera...

Qu'en est-il de la récupérabilité des déchets, composante technique de la réversibilité ?

La logique qui sous-tend la réversibilité affichée devrait bien être la possibilité pratique d'action en cas d'accident ou d'incident générique qui affecterait tout ou partie des colis. On doit pouvoir envisager d'évacuer tous les colis d'un type donné, par exemple ceux enrobés de bitume, ou tous les déchets vitrifiés ou tous les déchets d'une galerie déterminée, si des mesures *in situ* ou des incidents laissent à penser qu'une anomalie grave et imprévue risque de survenir (entrée d'eau, fissuration de la roche d'accueil, etc.).

De plus, dans ce genre de cas, et bien plus encore en cas d'accident (incendie, perte de ventilation, etc.), la notion de vitesse de sortie des colis devient un paramètre majeur, alors que l'enfouissement peut faire l'objet d'une planification temporelle sur plusieurs dizaines d'années. On imagine mal en effet l'idée d'une réversibilité au même rythme que celui adopté pour l'enfouissement (cent ans) pour répondre à une situation d'urgence.

D'où une série de questions actuellement sans réponse et qui concernent la capacité réelle de récupération des colis d'ici à la fermeture définitive potentielle du site vers 2130 :

– *Exhaure des colis à inspecter et à remettre éventuellement en état.* À quel rythme journalier peut-on sortir des colis en cas d'urgence ? Ce rythme dépend-il de la date à laquelle on a besoin de l'effectuer, entre 2030 et 2130 ? Ce rythme dépend-il de l'état d'endommagement éventuel des colis (en particulier leur état radiologique) ?

– *Entreposage sur les sites et atelier de réparation éventuelle des colis.* Quel type d'installation et quel dimensionnement du site d'entreposage des colis sortis des galeries ? Quelle capacité, quelle surface, quels aménagements de sûreté ? Quelles solutions de remise en état des colis sont envisagées selon le type de colis ? Ces remises en état éventuelles auront-elles lieu sur place ? Dans quel type d'installations, équipées de quels types de machines ? Sinon,

où ces colis seront-ils transportés et comment ? Quelles précautions de sûreté sont envisagées ?

– *Réintroduction éventuelle des colis dans les galeries.* La réintroduction des colis inspectés ou remis en état dans les galeries souterraines est-elle possible ? Si oui, à quel rythme ? Est-elle compatible avec l'exhaure simultanée de colis du même site de stockage ?

– *Aspects économiques.* Quels coûts pour l'ensemble de ces opérations à partir de quelques scénarios incidentels ou accidentels ? Quel peut être le coût de la réversibilité si elle porte sur une fraction importante (10 %, 20 %, 50 %) des colis stockés ?

– *Risques pour les riverains.* Quelles mesures de protection des populations riveraines en cas d'exhaure de colis plus ou moins abîmés ?

L'enfouissement de déchets radioactifs en profondeur dans la croûte terrestre est-il une solution acceptable ?

Il est aventureux de prétendre « imaginer l'inimaginable », expression favorite des promoteurs du Cigéo, quand il s'agit de « garantir » un stockage sans encombre pendant plus de cent mille ans. 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 unimaginables.

Plus concrètement, le risque d'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 selon ce critère.

Le second inconvénient est 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 maintenir ces déchets bien calfeutrés et ignorés. Pour les autres, il faut au contraire faire le maximum pour signaler, sur 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 ou non, suffisamment de bouleversements de toute nature peuvent survenir et la seule mémoire serait sans doute « qu'il y a quelque chose au fond qui pourrait bien être précieux » et qu'il faudrait aller le chercher.

Ce qui paraît à court et moyen terme 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. Le sous-sol est riche en matières premières et en ressources énergétiques, et il 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 internationales (sur le climat, sur la couche d'ozone, sur le milieu marin) tentent d'améliorer la situation de l'air et de l'eau, il n'est pas interdit de penser que les générations qui nous suivent seront moins destructrices et qu'une convention internationale verra bientôt le jour, interdisant le stockage en profondeur de tout déchet toxique ou radioactif. Une fois refermé, le stockage en profondeur serait un choix imposé aux générations futures, car irréversible dans la pratique.

Le choix de faire ou ne pas faire un stockage profond est loin d'être seulement scientifique et technique : c'est un choix éthique, politique et citoyen.

Quelle solution préconiser ?

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 subsurface.

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 « surirradier » les déchets avec des neutrons. Et l'énergie de ces neutrons dépend des éléments contenus dans les déchets. Il faudrait donc séparer complètement tous les déchets (c'est techniquement à peu près impossible et financièrement très élevé), mais cela ne « supprime » pas les déchets. Cela diminue simplement la durée de vie d'une partie des déchets (de dix mille ans à quelques centaines d'années...). La transmutation est encore étudiée par le CEA, mais cela ne concerne qu'une partie des déchets¹⁵. Cependant, le fait que cette voie de recherche paraisse décevante n'est pas une justification pour ne pas poursuivre les efforts en vue de réduire la nocivité des déchets radioactifs. La poursuite de ce domaine de la recherche doit être une priorité.

Le stockage en surface (considéré comme « définitif ») existe déjà pour des déchets de faible activité (les trois centres de stockage de l'Andra) et n'est pas sans poser des problèmes : il devrait être « contrôlé » pendant au moins trois cents ans, voire huit cents ans pour le Centre de stockage de la Manche car il contient trop de plutonium.

15. Le curium 244 représente 74 % de la puissance thermique des actinides mineurs. Il est également le siège de fission spontanée. Son activité (256,5 TBq/t) est supérieure à celle du plutonium 238, l'isotope le plus radioactif du plutonium (208,75 TBq). C'est la raison pour laquelle il est visé par la transmutation.

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, 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 cent réacteurs nucléaires). Ces piscines, auprès des réacteurs ou à la Hague, 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 la sécurisation de ces piscines, en premier lieu celle de la Hague.

À l'heure actuelle, il n'existe pas de solution satisfaisante pour la gestion des déchets. Celle qui paraît la moins mauvaise paraît être le « stockage à sec en subsurface ». Cette dénomination comprend deux composantes : l'entreposage à sec, qui est une technique, et la subsurface, qui est un contenant.

L'entreposage à sec existe déjà en France pour plusieurs types de déchets :

- les verres produits à la Hague qui contiennent les produits de fission et les actinides mineurs (éléments plus lourds que l'uranium, hors plutonium) qui sont issus des combustibles usés provenant des réacteurs et séparés par le retraitement ; ces déchets HA-VL sont entreposés à la Hague dans des silos verticaux et, comme ils sont très chauds, ils sont refroidis par une ventilation naturelle forte et une ventilation forcée ;

- le plutonium issu également du retraitement et non utilisé pour faire des combustibles MOX (un stock de 56 t environ à la Hague à la fin de l'année 2012, dont 18,2 t issues de combustibles usés d'origine étrangère) est lui aussi entreposé à sec en bunker à la Hague (le plutonium est très dangereux en cas d'inhalation ou d'ingestion, mais il émet du rayonnement X et peu de rayonnement gamma, et n'a pas besoin d'être refroidi) ;

- les déchets MA-VL et notamment les déchets en conteneurs de bitume sont entreposés à la Hague dans des hangars ventilés, sans autre protection.

Mais le plus intéressant est que l'Allemagne et surtout les États-Unis, où les combustibles usés (ou combustibles irradiés) sont considérés comme des déchets puisqu'ils ne sont pas retraités comme en France (qui est pratiquement le seul pays à le faire à grande échelle), ont développé et développent des entreposages de longue durée sur le site même des centrales nucléaires (ce qui évite les transports), à sec, pour les combustibles usés, après un séjour d'environ cinq ans dans les piscines de refroidissement situées auprès des réacteurs nucléaires. Les assemblages de combustibles sont placés chacun dans des conteneurs métalliques de type « Castor » (utilisés pour le transport des assemblages pour retraitement à la Hague) ou dans des conteneurs en béton. Aux États-Unis, la centrale de Surry (deux réacteurs de 840 MW de puissance électrique chacun, à uranium enrichi et eau sous pression, du même type que les cinquante-huit

réacteurs des centrales nucléaires françaises) est la première centrale à avoir adopté en 1986 le stockage à sec pour ses combustibles usés.

Quant à la « subsurface », il s'agit de stocker les combustibles irradiés des centrales sans aucun retraitement dans des galeries creusées à faible profondeur dans le flanc de montagnes granitiques. De la sorte, on facilite la surveillance et on garantit la possibilité d'extraire ces combustibles si une solution technique se présente. C'est la solution 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 existants est actuellement celui de la Hague.

Déchets radioactifs et politique de l'énergie

Aucune solution satisfaisante n'a été jusqu'ici trouvée pour éliminer les déchets radioactifs ni même pour réduire les risques qu'ils présentent, jusqu'à des centaines de milliers d'années pour certains d'entre eux.

C'est dès l'origine de la découverte de la possibilité d'utiliser l'énergie nucléaire par la fission des noyaux d'uranium 235 que l'impossibilité de traiter la question des déchets aurait dû amener à renoncer à cette technique. Il n'en a rien été. Au contraire : en 1974 déjà, les scientifiques savaient que le problème des déchets nucléaires deviendrait crucial. Mais certains d'entre eux estimaient qu'« avant que ce problème ne soit crucial, les scientifiques auront trouvé une solution ». C'était encore l'époque de la confiance absolue en la science...

Conscients de cette impasse, certains pays qui avaient développé cette utilisation y ont renoncé, notamment deux des quatre principaux pays de l'Union européenne, l'Italie et l'Allemagne. La position de l'Allemagne a été clairement exposée par Wolfgang Renneberg, directeur général chargé de la sûreté nucléaire au ministère allemand 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.

Une autre raison est que les nombreuses mesures qui sont nécessaires pour réduire les risques d'une utilisation des matériaux fissiles à des fins destructrices au niveau national et international ne peuvent remplir leur fonction de protection, de sûreté et de contrôle que si les pays concernés jouissent de conditions sociales, économiques et politiques stables. La fin de l'utilisation commerciale de l'énergie nucléaire en

Allemagne et l'arrêt du retraitement du combustible allemand réduisent le stock de matériaux «proliférants». À cet égard, ce choix contribue à réduire les risques de prolifération.

Et cela était dit bien avant Fukushima.

La même décision serait possible en France. À tout le moins, il est en tout cas indispensable de réduire la quantité de déchets radioactifs produits et cela de trois façons complémentaires : 1) réduire les consommations d'électricité, notamment pour les usages qui lui sont spécifiques (l'électroménager, l'audiovisuel, la bureautique et l'informatique dans les secteurs résidentiel et tertiaire représentent environ la moitié de la consommation totale d'électricité en France); 2) ne pas exporter d'électricité d'origine nucléaire (actuellement la réduction d'environ dix unités de 900 MW de puissance électrique), dont on garde en France les déchets nucléaires qui en résultent; 3) réduire la production d'origine nucléaire au profit de la production d'origine renouvelable (notamment éolien et photovoltaïque). De plus, il est 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 l'usine 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.

Débat public et avis citoyen

Conformément à la loi, un débat public a donc été organisé par la CNDP à partir d'avril 2012 sur le projet Cigéo : pas question d'autres solutions, pas question non plus d'attendre les deux ou trois mois nécessaires pour profiter des conclusions du débat national sur la transition énergétique lancé par le président de la République pour mener ce débat en pleine connaissance de cause. L'urgence d'une décision s'imposait pour une installation qui devrait ouvrir ses portes en 2025 et fermer définitivement en 2130.

Faute notamment d'une préparation suffisante avec les différentes parties prenantes, ce débat n'a pas été «public» : exaspérés par l'enchaînement des décisions gigognes qui aboutissait au projet d'enfouissement des déchets radioactifs sur le site de Bure et persuadés que «les décisions étaient déjà prises», nombre d'organisations refusèrent de participer au débat et des militants empêchèrent son déroulement, notamment dans les territoires concernés.

Non seulement les riverains n'avaient appris [qu'après la publication](#) de la loi de 2006 que le site de Bure, doté jusque-là d'un «laboratoire de recherche» par les pouvoirs publics, devenait sans débat le site officiel futur d'enfouissement des déchets, contrairement à tous les engagements pris, mais la notion d'entreposage pérenne disparaissait totalement au profit d'une «réversibilité pour cent ans» dont le contenu s'avérait pour le moins flou, voire cosmétique. Ajoutons qu'une expérience passée, déjà dans le domaine du nucléaire, a beaucoup joué pour expliquer les réticences actuelles : en 2006, la CNDP a lancé un débat sur l'opportunité de construire un EPR à Flamanville, alors que la décision était

déjà prise par le gouvernement. Il n'est alors pas étonnant de voir qu'un certain nombre de nos concitoyens se rebellent devant ce qu'ils considèrent comme un piège. Regretter l'absence de débat démocratique ne suffit pas. Encore faut-il en créer les conditions, en ne soumettant pas les citoyens à des faits accomplis, en reconnaissant à sa juste valeur l'intelligence collective.

Le débat public qui n'en était pas un s'est alors transformé en une série de neuf « débats contradictoires » en séances vidéo, organisés selon différents thèmes, auxquels participaient des « experts », promoteurs ou critiques du projet, à la demande de la CNDP. Des experts de Global Chance, du Groupement des scientifiques pour l'information sur l'énergie nucléaire (GSIEN) et de l'ACRO ont participé à cet exercice, considérant que, malgré les difficultés, la CNDP pouvait être un instrument du débat citoyen, à condition que les autorités décisionnelles en tiennent compte ; tout en soulignant qu'il ne s'agissait pas d'un débat public mais d'une phase d'information contradictoire qui aurait dû se tenir en préparation de celui-ci.

Cette opération vidéo, accompagnée de la publication de nombreux cahiers d'acteurs et de réponses aux questions des auditeurs, n'a pas été inutile : mise en évidence des faiblesses techniques du projet et de ses nombreux risques, mise en cause du principe même de l'enfouissement en profondeur, absence quasi totale d'information sur les coûts, trop grande précipitation dans le calendrier de décision...

À l'issue de ce débat amputé et afin d'améliorer la situation, la CNDP a organisé de décembre 2012 à février 2013 une « conférence de citoyens » sur l'enfouissement des déchets nucléaires. Celle-ci a bien mis en évidence l'importance d'une gestion optimale du temps (à l'horizon du siècle). Les citoyens proposent de prendre du temps (vingt ou trente ans) qui serait mis à profit de deux manières : 1) pour mener une opération de démonstration en site réel sur de faibles quantités de déchets, afin de vérifier la pertinence des solutions proposées (récupérabilité, gestion des accidents, etc.) sur un temps suffisamment significatif par rapport au temps nécessaire à l'enfouissement de l'ensemble des déchets prévus ; 2) pour mener des recherches sur les différentes autres voies de gestion des matières et déchets susceptibles de modifier radicalement les caractéristiques d'un stockage géologique éventuel, voire d'en permettre l'économie. La crédibilité d'une telle démarche impose que l'on soit capable de décrire un contenu assez précis de ces deux items.

On imagine en effet assez bien ce que pourrait être un programme de démonstration à petite échelle mais en site réel, et les étapes que cela implique. Mais il est indispensable de définir en parallèle un programme de recherche, avec la diversité de ses objectifs et de ses approches. Sans ce second pilier, qui permet d'envisager, en cas de succès, une modification profonde de la gestion des déchets, l'opération de démonstration n'apparaît plus que comme une étape, certes nécessaire, mais d'un processus quasiment inéluctable, l'enfouissement à terme de l'ensemble de ces déchets.

Il est donc essentiel d'accompagner la proposition faite par les citoyens d'une réflexion commune (associant pouvoirs publics, citoyens et chercheurs)

sur les objectifs et le contenu d'un programme de recherche destiné à mettre au jour une ou des alternatives. Ce programme devrait recouvrir plusieurs domaines :

- Une réflexion renouvelée sur la séparation des matières nucléaires en fonction de leurs caractéristiques, par exemple leur période. Un exemple : le regroupement actuel dans des colis HA-VL des produits de fission dont la durée de dangerosité se compte en trois ou quatre siècles avec les actinides mineurs dont la durée de dangerosité peut atteindre pour certains des millions d'années, était justifié par l'intérêt porté au plutonium, tout le reste étant classé uniformément comme déchet à haute activité. Si un programme de recherche sur les matériaux permettait d'assurer une durée de vie de plusieurs siècles à un entreposage, il deviendrait logique de séparer les produits de fission des actinides, d'entreposer trois cents ans ces produits de fission et de concentrer la recherche sur la diminution de la dangerosité (et de la période de cette dangerosité) des actinides. D'autres tris pourraient aussi être envisagés, en fonction de la capacité plus ou moins grande de migration des différentes matières dans un milieu donné.

- Une réflexion sur la capacité de brûlage ou de transmutation des différents éléments par différents moyens : générateurs de génération 4, accélérateurs de particules, réacteurs hybrides, etc.

- Une réflexion sur la notion et les moyens techniques et sociétaux d'un entreposage pérenne sur quelques siècles.

De toute façon, et parce que cela est de plus en plus indispensable pour les combustibles irradiés non retraités, une ou des installations de stockage à sec en subsurface doivent être construites en priorité.

Enfin, la complexité des problèmes soulevés par la gestion de déchets radioactifs dangereux pendant des siècles et des millénaires, et les risques qu'engendre leur production pour les générations actuelles et futures à des horizons que même l'imagination est totalement incapable de saisir, imposent à tous de se poser sérieusement la question de l'utilisation même de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité. Certains pays ont fait le choix [de ne pas ou plus y recourir](#) et, pour de multiples raisons, dont la production de déchets radioactifs, la France [devrait y songer](#).

BENJAMIN DESSUS est ingénieur et économiste, actuellement président de l'association Global Chance. ANDRÉ GUILLEMETTE est ingénieur, retraité de la Direction des constructions navales (DCN) de Cherbourg et membre du conseil scientifique de l'ACRO. BERNARD LAPONCHE est polytechnicien, ancien consultant international en politiques et en maîtrise de l'énergie, ancien ingénieur au CEA, membre fondateur de Global Chance et coauteur avec Benjamin Dessus d'*En finir avec le nucléaire* (Seuil, 2011). JEAN-CLAUDE ZERBIB est ingénieur en radioprotection, retraité du CEA et membre actif de Global Chance.

ANNEXE

Les centrales nucléaires en France

Nombre de centrales : 19

Nombre de réacteurs (1 tranche nucléaire par réacteur) : 58, dont 24 avec du combustible MOX. Les 4 réacteurs de Cruas peuvent utiliser du combustible à uranium de retraitement enrichi.

Puissance électrique installée nette : 63 130 MW.

*

Les dix-neuf centrales et leurs réacteurs nucléaires

Tranche nucléaire	Puissance électrique nette de la tranche ¹ (MW)	Année de la connexion au réseau
Belleville 1	1 310	1987
Belleville 2	1 310	1988
Blayais 1*	910	1981
Blayais 2*	910	1982
Blayais 3*	910	1983
Blayais 4*	910	1983
Bugey 2	910	1978
Bugey 3	910	1978
Bugey 4	880	1979
Bugey 5	880	1979
Cattenom 1	1 300	1986
Cattenom 2	1 300	1987
Cattenom 3	1 300	1990
Cattenom 4	1 300	1991
Chinon B1*	905	1982
Chinon B2*	905	1983
Chinon B3*	905	1986
Chinon B4*	905	1987
Chooz B1	1 500	1996
Chooz B2	1 500	1997
Civaux 1	1 495	1997
Civaux 2	1 495	1999
Cruas 1	915	1983
Cruas 2	915	1984
Cruas 3	915	1984

Cruas 4	915	1984
Dampierre 1*	890	1980
Dampierre 2*	890	1980
Dampierre 3*	890	1981
Dampierre 4*	890	1981
Fessenheim 1	880	1977
Fessenheim 2	880	1977
Flamanville 1	1 330	1985
Flamanville 2	1 330	1986
Golfech 1	1 310	1990
Golfech 2	1 310	1993
Gravelines 1*	910	1980
Gravelines 2*	910	1980
Gravelines 3*	910	1980
Gravelines 4*	910	1981
Gravelines 5*	910	1984
Gravelines 6*	910	1985
Nogent 1	1 310	1987
Nogent 2	1 310	1988
Paluel 1	1 330	1984
Paluel 2	1 330	1984
Paluel 3	1 330	1985
Paluel 4	1 330	1986
Penly 1	1 330	1990
Penly 2	1 330	1992
Saint-Alban 1	1 335	1985
Saint-Alban 2	1 335	1986
Saint-Laurent B1*	915	1981
Saint-Laurent B2*	915	1981
Tricastin 1*	915	1980
Tricastin 2*	915	1980
Tricastin 3*	915	1981
Tricastin 4*	915	1981

* Réacteur équipé du combustible MOX.

1. Une «tranche nucléaire» désigne l'ensemble réacteur-turboalternateur. La puissance électrique est donc celle de la tranche nucléaire relative à chaque réacteur. Mais en langage courant, on parle souvent, à tort, de la puissance électrique d'un réacteur (ce qui peut porter à confusion). Le réacteur lui-même produit de la chaleur. La puissance thermique d'un réacteur dont la «tranche» a une puissance électrique de 900 MW de puissance électrique est de l'ordre de 2 800 MW. Le rendement d'une tranche nucléaire de 900 MW (en pratique d'une puissance nette de 880 à 915 MW de puissance nette selon les réacteurs), rapport de la puissance électrique de la tranche à la puissance thermique du réacteur, est donc de 32 % (31,7 à 33 %).

