

Les cahiers de



LE CASSE-TÊTE DES MATIÈRES ET DÉCHETS NUCLÉAIRES



N° 34 - Novembre 2013
ISSN 1270-377X

Global Chance

Association loi de 1901
sans but lucratif
(statuts sur simple demande)
17 ter rue du Val
92190 Meudon
contact@global-chance.org

Le Conseil d'Administration
de Global Chance
est composé de :

Edgar Blaustein

Trésorier de l'Association

Bernard Devin

Secrétaire de l'Association

Benjamin Dessus

Président de l'Association

Andreas Rüdinger

Bernard Laponche

Ce numéro
des Cahiers de Global Chance
est consultable sur le site
www.global-chance.org

Les cahiers de
Global Chance
N° 34
Novembre 2013

Directeur de la publication :
Benjamin Dessus
Rédaction :
Benjamin Dessus
Maquette : Philippe Malisan
Imprimerie : Alliance

SOMMAIRE

Éditorial

3

Matières nucléaires dangereuses et déchets nucléaires : de quoi parle-t-on ?

5

Rédaction de Global Chance

Plutonium : Ressource énergétique ou fardeau mondial ?

11

Plutonium et combustible Mox

Global chance

12

Panorama international - nature et origine de l'impasse plutonium et quelques options de sortie

*Professeur Frank von Hippel - Program on Science and Global Security, Princeton
University - Co-chair, International Panel on Fissile Material (IPFM).*

14

L'échec de l'industrie du plutonium au Royaume-Uni

*Professeur Gordon Mac Kerron - Director, Science Policy Research Unit (SPRU),
University of Sussex, United Kingdom.*

21

Les combustibles MOX d'EDF: Radiotoxicité et bilans thermiques, production et stockages, bilans 2011

*Jean-Claude Zerbib et André Guillemette - Respectivement: Ingénieur
radioprotection, ancien du CEA - Ingénieur, ancien de la DCN, Cherbourg.*

24

L'approche allemande: abandon du retraitement et entreposage – stockage à sec dans des conteneurs

*Klaus Janberg - Ancien président directeur général de la GNS (compagnie
allemande de service nucléaire: gestion et traitement des déchets).*

28

Les défis non relevés de la stratégie française du plutonium

*Mycle Schneider - Consultant international en énergie et politique nucléaire
(Mycle Schneider Consulting), basé à Paris.*

33

Le Projet CIGEO.

39

L'enfouissement géologique des déchets nucléaires de haute activité en France: quels types de déchets, quelles quantités ?

Jean Claude Zerbib, André Guillemette

40

Cigéo, une faisabilité en question

Bertrand Thuillier

59

Éléments de conclusion et recommandations

67

Rédaction de Global Chance

Éditorial

Dans le domaine de la production d'électricité d'origine nucléaire, c'est évidemment la catastrophe de Fukushima de 2011, avec le cumul de trois accidents majeurs de réacteurs et leurs premières et graves conséquences sur les populations et la nature qui a fait l'actualité de ces deux dernières années. À cette occasion, au-delà des conséquences à très court terme de ces accidents sur les populations japonaises, le monde a pris conscience de l'incapacité dans laquelle se trouvait la communauté scientifique et industrielle japonaise, voire internationale, de tracer un scénario crédible de fin de crise, et de fournir une information tant soit peu crédible sur l'évolution de la situation des réacteurs et des piscines endommagés. Les gestes désordonnés d'urgence non maîtrisée se succèdent, les mauvaises surprises se cumulent, l'impensable de la veille devient la réalité du lendemain, l'impression d'impuissance domine.

Dans ce contexte d'urgence chaque jour prolongée depuis plus de deux ans, la question du devenir des déchets et matières nucléaires non utilisées des parcs actuels est logiquement passée au second plan de la préoccupation de nos concitoyens. C'était pourtant la préoccupation première des Français dans les années 1980-2010, comme en attestent tous les sondages de cette époque où nos concitoyens acceptaient en majorité le discours des autorités et de l'industrie nucléaire sur l'impossibilité d'un accident nucléaire majeur dans notre pays. Elles n'avaient pourtant pas ménagé leurs efforts tout au long des années 70 pour minimiser l'importance de cette question : l'ensemble des déchets nucléaires français les plus dangereux tiendrait aisément dans une piscine olympique !

Dès les années 80 cependant, 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.

C'est la loi de 1991¹ qui allait fixer les axes d'un programme de recherche sur la gestion des déchets radioac-

tifs, 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 de ces déchets. La loi transformait l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), jusque-là un département du CEA, en établissement public industriel et commercial (statut EPIC) indépendant.

L'application de la loi de 1991 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, 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 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 demandait 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, le débat public a mis à jour l'ambiguïté des termes utilisés et montré qu'il fallait élargir la problématique à l'ensemble des matières nucléaires dangereuses, tant la notion de « déchets ultimes » paraissait inadéquate et réductrice.

On constatait en effet qu'au-delà des stocks de déchets qualifiés de déchets ultimes (au sens où ils ne pouvaient faire l'objet d'aucune utilisation dans l'état actuel des techniques), il existait des stocks beaucoup plus importants de matières nucléaires tout aussi dangereuses mais qui échappaient à cette définition, car il n'était pas impossible qu'elles puissent trouver un usage, dans un avenir indéterminé, et au moyen de technologies non démontrées...

Quant aux déchets considérés aujourd'hui comme « ultimes » (les déchets MAVL et HAVL), ils étaient l'objet de recherches intenses de la part du CEA pour

¹ - 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.

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 milliers de m³ (la fameuse « piscine olympique ») mais bien de creuser des dizaines de km 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. C'est dans cet esprit que Global Chance publiait en septembre 2005 un « Petit mémento des déchets nucléaires - *Éléments pour un débat sur les déchets nucléaires en France* », dont la plupart des analyses restent encore aujourd'hui d'actualité.

Mais 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 l'ANDRA, avec le soutien des pouvoirs publics, proposait comme unique solution l'enfouissement définitif de ces matières dans une couche géologique profonde, émergeait du débat un nouveau concept, celui « d'entreposage pérenne ».

Il s'agissait dans l'esprit de ses défenseurs d'entreposer les déchets en question de façon pérenne dans des conditions qui autorisent leur examen périodique, par exemple tous les 30 ou 50 ans, la remise en état de leurs emballages de protection, leur recyclage éventuel si des progrès technologiques le permettaient : une stratégie s'appuyant plus sur la confiance dans la société et le progrès technique que dans la géologie qui a rencontré l'approbation d'un grand nombre des citoyens participant au débat. L'important n'est plus comme pour le stockage géologique la pérennité physique et l'intégrité du stockage, mais bien plutôt l'engagement de la société à vérifier périodiquement l'intégrité des colis stockés, et si nécessaire, à les extraire de leur lieu d'entreposage, à les réparer ou les reconditionner, voire à recréer un nouveau site d'entreposage. Le président du CNDP, présentant le bilan du débat de 2006, affirmait d'ailleurs : « *La population a montré son incrédulité totale à l'égard des prévisions à long terme (justifiant aux yeux de l'administration le choix d'un stockage géologique) : personne ne peut savoir ce qui se passera dans mille ans, dans dix mille ans. Est apparue l'idée qu'aux échéances d'une à quelques décennies, il était sage d'ajouter des échéances de moyen terme (100-150 ans)* ». Il ajoutait : « *L'apport le plus notable du débat public est l'apparition d'une nouvelle stratégie... l'idée d'entreposage pérennisé, non plus solution provisoire, fut-elle de longue durée, mais autre solution de stockage* ».

La loi de juin 2006² qui a suivi ce débat n'a malheureusement 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 ». D'autre part, « 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 d'entreposage reste réservé à des opérations de nature temporaire. La loi prévoit enfin qu'un débat public sur l'installation de stockage géologique sera organisé. C'est sur ces bases que l'ANDRA a mis sur pied le projet CIGEO (Centre Industriel de Stockage Géologique) de stockage géologique réversible des déchets nucléaires qui fait aujourd'hui, conformément à la loi, l'objet d'un débat public sous l'égide de la CNDP. Ce débat soulève d'importantes controverses qui portent 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 projet CIGEO.

Le présent numéro de Global Chance revient une nouvelle fois sur la question de la gestion de l'ensemble des matières et des déchets radioactifs. Après une première partie consacrée au rappel du statut et de l'inventaire actuel des principaux déchets et matières nucléaires non valorisées et des risques qu'ils présentent, la deuxième partie de ce numéro est consacrée à la question du plutonium à travers un compte rendu exhaustif du colloque « Plutonium, ressource énergétique ou fardeau mondial » qui s'est tenu à Paris le 13 mars dernier à l'initiative de l'IPFM³ et de Global Chance. La troisième partie replace le projet CIGEO de stockage géologique des déchets nucléaires dans l'ensemble des questions de gestion des matières et déchets existants ou à venir, pour en apprécier la pertinence et les limites et s'interroge sur les caractéristiques même du projet proposé, en particulier en termes de sûreté.

Global Chance

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

3 - IPFM : International Panel on Fissile Materials, créé en 2006, est un groupe indépendant d'experts en matières de contrôle d'armement et de non-prolifération. Le panel est basé à l'Université de Princeton. Les co-présidents en sont le Professeur Frank von Hippel de Princeton et le Professeur émérite R. Rajaraman de l'Université Jawaharlal Nehru, New Delhi. Les membres du panel sont issus de dix-sept pays. La mission de l'IPFM est fournir les bases d'initiatives politiques destinées à sécuriser, consolider et réduire des stocks de d'uranium hautement enrichi et de plutonium, pour prévenir la prolifération des armes nucléaires et leur acquisition par des organisations terroristes.

Matières et déchets nucléaires : de quoi parle-t-on ?

Rédaction de Global Chance

Quand on parle de déchets nucléaires aujourd'hui pour aborder leur gestion à court et moyen terme, leur entreposage ou leur stockage éventuel, on est automatiquement confronté à un piège sémantique majeur. En effet, le discours et la stratégie des pouvoirs publics et de l'industrie nucléaire françaises se fondent sur une définition apparemment classique et sans ambiguïté de la notion de déchets, voire de déchets ultimes, mais qui, dans le cas très particulier du nucléaire, se révèle très insuffisante pour rendre compte des difficultés et des risques auxquels ces stratégies conduisent.

Le terme de « déchets radioactifs » 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, dans son article 5, définit les déchets radioactifs comme ceux pour lesquels aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou « envisagée ».

« Une substance radioactive est une substance qui contient des radionucléides, naturels ou artificiels, dont l'activité ou la concentration justifie un contrôle de radioprotection. Une matière radioactive est une substance radioactive pour laquelle une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée, le cas échéant après traitement. Un combustible nucléaire est regardé comme un combustible usé lorsque, après avoir été irradié dans le cœur d'un réacteur, il en est définitivement retiré. Les déchets radioactifs sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée. Les déchets radioactifs ultimes sont des déchets radioactifs qui ne peuvent plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux. »

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 qui contiennent des quantités significatives de matières fissiles (susceptibles de donner une réaction 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.

La notion de déchet nucléaire ne fait par conséquent référence ni à la dangerosité pour l'homme des matières en question ni au temps de présence de ces matières sur le sol national, mais uniquement à leur caractère éventuellement recyclable ou non.

D'où une double ambiguïté :

- *Tout d'abord au niveau du langage.* Pour un américain ou un suédois, les combustibles irradiés ont le statut des déchets nucléaires dont il faut envisager la gestion, l'entreposage et éventuellement le stockage à long terme. Pour les autorités et l'industrie nucléaire française, défenseurs du retraitement des combustibles irradiés, seuls 4 à 5 % des matières contenues dans les combustibles usés ont le statut de déchets puisque les 95 autres peuvent se révéler recyclables, dans des délais et grâce à des technologies qui n'ont pas besoin d'être précisées.
- *Ensuite au niveau des risques.* Pour les citoyens en effet, la notion de risque engendré par les « déchets nucléaires » réside dans la *présence* sur le sol national de matières nucléaires dangereuses pour l'homme ou l'environnement et dans la *durée* de cette présence dans notre environnement. Et le terme « valorisable » associé aux matières nucléaires n'apporte aucune information sur ces deux aspects.

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 nature :

- Les produits de fission qui se caractérisent par leur très forte activité en rayonnement γ à haute énergie et donc susceptibles d'être dangereux pour l'homme à grande distance, mais pour des temps relativement courts (quelques centaines d'années).
- Les actinides produits dans le réacteur au moment de la fission de l'uranium, au premier rang desquels on trouve le plutonium mais aussi toute une série d'autres produits dénommés actinides mineurs. Cet ensemble de produits est essentiellement émetteur de radiations α et β , mais dont la portée est beaucoup plus faible.

Si l'on peut donc se protéger relativement facilement de ces radiations (par exemple avec des écrans de faible épaisseur), ils deviennent très dangereux pour l'homme par inhalation ou ingestion. Les durées de vie de ces actinides sont très diverses. Certains de ces actinides ont une « période radioactive » très élevée¹.

Le plutonium par exemple est produit en quantités importantes dans le cœur des réacteurs nucléaires, à partir de l'uranium. Il est constitué d'un ensemble d'isotopes (²³⁶Pu, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu et ²⁴¹Pu). Tous les isotopes et composés du plutonium sont toxiques et radioactifs. La toxicité d'une quantité de plutonium dépend de sa composition en différents isotopes, chacun ayant une période radioactive spécifique et un type différent d'émission de particules². Par décroissance radioactive, tous les isotopes du plutonium donnent naissance à un autre isotope émetteur alpha. Ainsi, le Pu²³⁹ a une période radioactive de 24 110 ans, tandis que celle de Pu²⁴¹ est de 14,4 ans et celle de Pu²³⁸ de 87,7 ans.

Dans le plutonium couramment produit dans les réacteurs des centrales nucléaires, la radioactivité³ provient surtout de Pu²⁴¹ (émetteur « bêta », électrons) et de Pu²³⁸ (émetteur « alpha », noyau d'hélium).

Si des particules de plutonium sont inhalées ou ingérées, elles irradient directement les organes où elles se 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 notamment⁴. En termes de radioprotection, la limite de dose annuelle induite par une activité nucléaire pour le public (1 millisievert⁵/an) se traduit par une inhalation de Pu²³⁹ d'environ 1/100^e de microgramme⁶.

D'autre part, le plutonium constitue le matériau privilégié des armes atomiques. Il suffit en effet de quelques kg de plutonium issu du retraitement pour fabriquer une arme nucléaire, si l'isotope 239 est à forte teneur (seuls les isotopes 239 et 241 sont fissiles).

Les matières dites « valorisables » sont l'uranium issu du retraitement⁷ et le plutonium pur ou dispersé dans des éléments combustibles (combustible uranium irradié, combustible MOX irradié) ou des déchets de fabrication de la chaîne du plutonium. Ils sont en effet susceptibles de produire de nouvelles fissions.

L'évolution du bilan de l'ensemble des matières nucléaires dangereuses, pour plusieurs dizaines ou centaines d'années, ne doit donc pas être confondu avec celui des déchets dont l'acceptation dépend à la fois de l'état des technologies et des stratégies développées par les acteurs du nucléaire.

Mais, quelle que soit la définition de la notion de déchets, une première remarque s'impose : la nature et la quantité de matières nucléaires dangereuses pour l'homme reste constante (sauf en cas de transmutation) dans tous les cas. C'est dire que, quelles que soient les méthodes employées pour les gérer, on retrouve les mêmes quantités des différentes matières nucléaires.

*Le retraitement n'a donc ni pour but ni pour résultat de **réduire** la dangerosité des matières nucléaires, mais d'en **séparer** partiellement les éléments pour tenter d'en valoriser certains et d'en gérer d'autres dans des conditions considérées comme plus sûres et/ou moins onéreuses.*

1 - Période au bout de laquelle l'activité radioactive du matériau est divisée par deux.

2 - Les isotopes du plutonium sont des émetteurs alpha à 100 % à l'exception du plutonium 241 qui est un émetteur bêta pratiquement « pur » (émission additionnelle alpha de 2,3 millièmes de %).

3 - Le becquerel (Bq) est l'unité de mesure de l'activité d'une source de rayonnements. 1 Bq correspond à une désintégration de noyau par seconde. Cette unité est très petite et on utilise couramment ses multiples, dont le térabecquerel (TBq : 10¹² Bq ou mille milliards de becquerels).

4 - La fraction du plutonium qui passe dans le sang d'un adulte se fixera à raison de 50 % dans le squelette et 30 % dans le foie. La fraction fixée sur le squelette est plus importante chez le bébé ou le jeune enfant.

5 - 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 pondérations 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.

6 - La quantité de plutonium qui passe dans le sang dépend de sa forme chimique. Trois formes sont considérées pour les calculs de dose. La masse qui délivre 1 mSv/an varie de 0,35/100^e à 2,7/100^e de microgramme.

7 - Comme la France ne dispose pas d'installation nucléaire permettant d'enrichir l'uranium du retraitement (plus irradiant que l'uranium naturel) qui présente des pollutions en produits de fission et en actinides, l'enrichissement de cet uranium est réalisé en Russie. Cet uranium de retraitement enrichi (URE) n'est utilisé par EDF que dans les réacteurs de la centrale nucléaire de Cruas. Ce recyclage ne concerne en pratique qu'une fraction de l'uranium produit par le retraitement qui constitue un déchet encombrant.

D'où la nécessité de dresser des bilans complets de matières nucléaires dangereuses présentes à un instant donné sur le sol national et non pas seulement de celles qu'on appelle des « déchets » pour rendre compte de la potentialité des risques présentée par l'activité nucléaire.

Pour rendre plus concrète cette remarque il est intéressant de comparer la situation créée par la stratégie de retraitement adoptée par la France à une situation sans retraitement des mêmes quantités de matières nucléaires irradiées.

Pour ce faire on propose d'analyser de façon distincte les questions de toxicité radioactive et les questions d'atteintes par radiations à distance.

La radiotoxicité

Elle est essentiellement le fait des actinides (plutonium et actinides mineurs contenus dans les combustibles usés). Les deux tableaux suivants montrent pour l'UOX et le MOX la répartition des toxicités dues au plutonium et dues à l'ensemble des actinides mineurs de combustibles usés refroidis pendant une période de 3 ans. La toxicité potentielle est analysée ici dans l'hypothèse d'une contamination interne par voie digestive (consommation d'eau contaminée).

Tableau n° 1 : Toxicités comparées en plutonium et actinides d'une tonne de combustible UO₂ usé, après 3 ans de vieillissement

	masse (g/t)	activité (TBq/t)	Dose potentielle (Sv/t)
Pu total	11 214	4 842	7,742.10⁷
Actinides mineurs	1238	328	3,900.10⁷

Tableau n° 2 : Toxicités comparées en plutonium et actinides d'une tonne combustibles MOX usé, après 3 ans de vieillissement

	masse (g/t)	activité (TBq/t)	Dose potentielle (Sv/t)
Pu total	66607	38433	5,836.10⁸
Actinides mineurs	6040	3549	4,255.10⁸

Dans le cas de l'UOX, les actinides mineurs représentent de l'ordre de 34 % de la radiotoxicité totale des actinides (plutonium et actinides mineurs) du combustible usé et le plutonium les deux tiers (66,5 %); dans le cas du MOX usé les actinides mineurs représentent 42 % de la radiotoxicité de l'ensemble des actinides du MOX et le plutonium 58 %.

On voit que dans les deux cas la radiotoxicité des combustibles est largement dominée par celle du plutonium.

L'opération retraitement séparation effectuée à la Hague a pour conséquence d'isoler les actinides mineurs du plutonium et les produits de fission et de les vitrifier pour en éviter au maximum les risques de dispersion dans l'eau ou l'atmosphère. Si cette opération ne garantit pas contre une telle dispersion à très long terme, il paraît probable qu'elle l'assure dans de bonnes conditions pour plusieurs décennies.

Par contre cette opération met en place un flux de plutonium fortement radiotoxique qui représente de l'ordre des deux tiers de la radiotoxicité totale des combustibles usés, et de plus, sous une forme pulvérulente, qui accroît considérablement les risques associés à sa dispersion éventuelle.

Du point de vue de la radiotoxicité à court et moyen terme (quelques décennies) on peut considérer que le processus « retraitement-séparation-vitrification » s'attaque au mieux à un tiers du problème de la radiotoxicité et laisse entier les deux tiers de la question. Resterait encore à comparer les risques radiotoxiques entraînés par l'entreposage de combustible usé plutôt que d'entreposage de plutonium (en attendant son usage éventuel) dans différents scénarios accidentels.

L'ambiguïté de la situation tient au fait que l'on fait semblant d'admettre que le plutonium créé par retraitement est ou va être réutilisé complètement et à court terme. Ce qui est historiquement faux et très probablement inatteignable à l'avenir sans pari technologique et industriel majeur.

Historiquement faux puisque le bilan actuel se solde par près de 40 tonnes de plutonium en stock à la Hague⁸ (l'équivalent en terme de radiotoxicité de 4545 tonnes d'UOX irradié (50 x 1000/11, 4,5 ans de production nucléaire en UOX) 12000 tonnes d'UOX irradiés entreposés à la Hague ou dans les centrales fin 2010, 1300 tonnes de MOX irradiés entreposés à la Hague (pour mémoire entre 1976 et 2010 16800 tonnes de combustible UOX d'origine française ont été traités). D'autre part les simulations d'évolution jusqu'à 2030 selon le programme affiché par le Président de la République (50 % de nucléaire en 2025) et deux versions du retraitement - 1- Pas de retraitement du MOX et de l'URE et limitation du retraitement aux besoins de MOX des 900 MW- 2- Retraitement intégral des MOX, URE et UOX- conduisent respectivement en 2030 à la présence de **38** tonnes de Pu, **3 000** tonnes de MOX, **16 000** tonnes de UOX dans le premier cas et de **426** tonnes de Pu dans le second cas.

Pour la petite histoire, on pourra remarquer que les surfaces nécessaires au stockage des déchets pour les deux stratégies atteignent respectivement 4,5 et 2,7 km², 2000 à 4000 fois plus que la fameuse « piscine olympique » régulièrement évoquée par les défenseurs du nucléaire pour montrer l'insignifiance du problème

Dans tous les cas il reste une bonne partie de la radiotoxicité hors des déchets ultimes.

On peut donc dire que le retraitement n'apporte à court et moyen terme qu'une contribution mineure à la réduction du risque :

- faible diminution des quantités confinées
- risques aggravés des quantités non confinées.

La radioactivité

En ce qui concerne la radioactivité, le retraitement qui permet de séparer ces composants du plutonium, de confiner ces produits dans des verres et de les enfouir est a priori protecteur, tout au moins à court ou moyen terme, puisqu'il soustrait ces produits à la présence humaine. Par contre, les combustibles usés Mox et Uox, dans la mesure où ils ne sont pas enfouis directement à court ou moyen terme présentent des risques de radioactivité importants qui nécessitent un confinement sous surveillance permanente. On peut en donner un ordre de grandeur en examinant la radioactivité au sol ou enfouie pour les deux stratégies exposées ci dessus en 2030, retraitement partiel et retraitement total (après trois ans de refroidissement).

Le retraitement total permet d'enfouir de l'ordre de 2, 1 milliards de térabecquerels (de produits de fission, d'activation et d'actinides mineurs). Le retraitement partiel ne permet d'enfouir que de l'ordre de 1,2 milliard de TBq, et conduit donc à laisser au sol une radioactivité de l'ordre de 1 milliard de terabecquerels.

Mais l'avantage supplémentaire de protection vis-à-vis de la radioactivité qu'on peut attendre du retraitement se paye par une présence supplémentaire de plutonium de l'ordre de 400 tonnes dont on déjà signalé les risques de radiotoxicité et de prolifération.

Les déchets autres que les HAVL et MAVL

La question de l'inventaire, de la gestion et des risques liés aux déchets ne s'arrête pas là.

D'une part parce qu'il existe déjà une série de déchets autres que les déchets à haute ou moyenne activité dont nous venons de traiter (et qui sont supposés être enfouis à l'exception du plutonium, cf projet Cigeo). Il s'agit des déchets de faible ou moyenne activité à vie courte (FMA-VC) et des déchets de très faible activité (TFA). D'autre part, la poursuite du programme nucléaire et de démantèlement des centrales va créer des nouveaux déchets, eux-mêmes sources de risques de radiotoxicité et de radioactivité.

Nous n'aborderons que très succinctement et pour mémoire cette question qui a été traitée en détail dans le numéro 29 des Cahiers de Global dans un article d'Yves Marignac « MATIÈRES ET DÉCHETS NUCLÉAIRES DE QUOI PARLE-T-ON ? ».

La France compte à ce jour 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. On dénombre ainsi :

- le Centre de stockage de la Manche (CSM), qui contient 527 225 m³ 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 surveillance ;
- le Centre de stockage de l'Aube (CSA), qui contenait selon l'Andra, fin 2011, 255 143 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 ;

⁸ - Au 31/12/2012, il y avait à La Hague 56 tonnes de plutonium entreposés, dont 37,8 t appartenant à la France.

- le Centre de stockage des déchets de très faible activité (CSTFA) de l'Aube. Ouvert depuis 2003, le centre a une capacité de 650 000 m³ qui ne sera pas suffisante pour accueillir l'ensemble des déchets de démantèlement attendus des installations existantes, évalué avec encore beaucoup d'incertitude malgré la précision du chiffre, à 869 311 m³ à la fin 2030, et 637 500 m³ de plus après 2030. Fin 2011, le CSTFA avait stocké 203 435 m³ de déchets, ce qui représentait 31 % de la capacité totale de stockage autorisée (650 000 m³).

Une part non négligeable des déchets relevant de ces catégories reste, malgré l'existence de ces 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. Un problème plus fondamental encore est posé par les déchets présentant d'autres caractéristiques, en particulier une radioactivité plus élevée ou une durée de vie beaucoup plus longue. Ces déchets ne disposent aujourd'hui d'aucune solution d'élimination et de stockage, et sont entreposés, auprès des réacteurs et des usines ou dans des sites dédiés, sous une forme plus ou moins correctement conditionnée. On distingue en particulier :

- les déchets FMA-VC tritiés, principalement issus du programme nucléaire militaire, dont l'entreposage pour décroissance est à l'étude dans le cadre de la loi de 2006. L'Andra estimait à 2 905 m³ le volume dans leur conditionnement définitif de ces déchets existants au 31 décembre 2007 ;
- les déchets faiblement radioactifs à vie longue (FA-VL), notamment les déchets radifères, principalement issus de l'industrie du radium, et les déchets de graphite qui correspondent aux chemises et empilements des assemblages combustibles des réacteurs de première génération, dits uranium naturel-graphite-gaz (UNGG). L'Andra estimait leur volume existant fin 2007, en équivalent conditionné, à 82 536 m³ ; toutefois 8 137 m³ seulement font l'objet d'un conditionnement final. Le stockage de ces déchets est à l'étude et un site est recherché pour son implantation. Le délai fixé par la loi de 2006 pour la mise en service de ce site (2013), est déjà reconnu comme intenable, et la procédure de recherche de site est dans une impasse après le désengagement des deux municipalités s'étant dans un premier temps portées candidates.

Enfin du point de vue des volumes en jeu, le volet principal de l'inventaire porte sans doute sur l'ensemble des sites issus de l'exploitation des mines d'uranium françaises, commencée dans les années cinquante et arrêtée avec la fermeture de la dernière mine à Jouac, en 2001.

Conclusion

À l'issue de cette analyse plusieurs remarques méritent d'être mises en relief :

- 1- Contrairement au message généralement propagé par l'industrie nucléaire, le retraitement n'a donc ni *pour but* ni *pour résultat de réduire la dangerosité des matières nucléaires, mais d'en séparer partiellement les éléments pour tenter d'en valoriser certains et d'en gérer d'autres dans des conditions considérées comme plus sûres et/ou moins onéreuses.*
- 2- *La transmutation des actinides et des produits de fission, présentée dans les années 90 comme une voie prometteuse de diminution de la quantité de déchets de haute activité à très longue durée de vie semble un échec.*
- 3- *La stratégie de poursuite de retraitement présentée comme actuellement incontournable n'apporte pas d'amélioration réelle aux questions de protection des populations contre les risques de radiotoxicité pour le siècle qui vient. En particulier, la constitution d'un stock considérable de plutonium qu'entraînerait le retraitement intégral de l'ensemble des combustibles (plus de 400 tonnes) ferait courir des risques considérables à l'humanité à la fois en termes de radiotoxicité et de prolifération, risques qui se pérenniseraient sur plus d'un siècle, même si la génération 4 des réacteurs se développait sans aucune difficulté technique, économique et sociale.*

Ces remarques permettent de mettre dans une perspective plus juste la place du projet Cigéo de stockage géologique des déchets dans l'ensemble du dispositif nécessaire à la protection des populations actuelles et des générations futures.

Plutonium : Ressource énergétique ou fardeau mondial ?

COLLOQUE GLOBAL CHANCE – IPFM – PARIS, 19 MARS 2013

Ce chapitre présente un résumé des différentes interventions prononcées au cours du colloque organisé par Global Chance et l'International Panel on Fissile Materials à Paris le 19 mars 2013. Nous l'avons précédé d'un court exposé introductif sur le plutonium et le combustible Mox pour en définir précisément les caractéristiques, les propriétés et les risques.

Plutonium et combustible MOX

Rédaction Global chance

Le plutonium

Le plutonium est un élément chimique de numéro atomique 94 et de symbole « Pu » qui n'existe dans la nature qu'en quantités infimes et qui est produit en quantités importantes dans le cœur des réacteurs nucléaires, à partir de l'uranium (numéro atomique 92 et symbole U).

Le plutonium produit dans les réacteurs est constitué d'un ensemble d'isotopes. Les uns, les plutoniums 239, 240, 241, 242, 243 sont produits à partir de la capture d'un neutron par un noyau d' U^{238} et l'isotope Pu^{238} est produit à partir de l' U^{235} .

Comme l' U^{235} , le Pu^{239} est fissile (le Pu^{241} également) et contribue à la réaction en chaîne dans le réacteur au fur et à mesure de sa création.

Du fait du rôle principal du Pu^{239} fissile, on oublie généralement les autres isotopes. Dans le cas d'un réacteur à eau et uranium enrichi, le Pu^{239} représente en poids 59 % du plutonium contenu dans le combustible usé et le Pu^{241} , 11 %, ce qui porte à 70 % la proportion d'isotopes fissiles, soit plus des deux tiers du Pu total.

Si le Pu^{239} est sur le plan « pondéral » l'isotope majeur du plutonium produit dans le réacteur, il n'en va pas de même en termes de charge radioactive.

Tous les isotopes et composés du plutonium sont toxiques et radioactifs. La radioactivité d'une quantité de plutonium dépend de sa composition en différents isotopes, chacun ayant une « durée de vie » différente et un type différent d'émission de particules¹.

Ainsi, le Pu^{239} a une « demi-vie » (temps au bout duquel la moitié de la quantité initiale de cet isotope s'est transformée) de 24110 ans, tandis que celle de Pu^{241} est de 14,4 ans et celle de Pu^{238} de 87,7 ans.

Dans le plutonium couramment produit dans les réacteurs des centrales nucléaires, la radioactivité provient surtout de Pu^{241} (émetteur « bêta », électrons) et de Pu^{238} (émetteur « alpha », noyau d'hélium). De plus, le Pu^{241} se transforme en américium 241, émetteur « alpha » de 433 ans de demi-vie. L'activité massique très élevée du plutonium 238 produit, par absorption des « alpha » dans le combustible, un fort dégagement de chaleur.

Si des particules de plutonium sont inhalées ou ingérées, elles irradient directement les organes où elles se sont déposées : le poumon dans le cas d'une inhalation et dans le cas d'une ingestion le foie et les surfaces osseuses notamment. La période biologique du plutonium est très longue car l'élimination de 50 % de la charge de l'organisme nécessiterait 50 ans dans le squelette et 20 ans environ dans le foie. Il peut donc affecter l'ADN et provoquer des cancers.

Les installations industrielles traitant du plutonium (usines de retraitement, usines de fabrication de combustibles au plutonium, transports de plutonium) nécessitent des barrières de protection épaisses (béton, hublots épais...) pour se protéger des émissions de rayonnements « gamma » et « neutrons » (neutrons qui proviennent des réactions nucléaires dans l'oxyde de plutonium qui est la matière ouvragée) et du risque de criticité. Une dépression doit également être assurée afin d'éviter toute sortie accidentelle d'aérosols des zones actives.

En termes de radioprotection, la limite de dose annuelle induite par une activité nucléaire, fixée par les autorités de radioprotection pour le public (1 millisievert/an) peut se traduire en limite d'incorporation du plutonium par voie respiratoire ou digestive. Ce calcul donne, pour un adulte du public exposé à l'inhalation de Pu^{239} , environ 1/100^e de millièème de gramme (1/100^e de microgramme).

1 - Les isotopes du plutonium sont des émetteurs alpha à 100 % à l'exception du plutonium 241 qui est un émetteur bêta pratiquement « pur » (émission additionnelle alpha de 2,3 millièème de %).

Production et utilisation du plutonium

À la fin de leur utilisation dans le réacteur nucléaire d'une centrale électrique (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, 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 auront 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 de leurs propres centrales, mais aussi, dans le passé, pour des combustibles « étrangers » (Allemagne, Belgique, Italie, Japon², Pays Bas, Suède, Suisse...).

La technique du 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.

Le MOX

En parallèle à cette utilisation, un nouveau combustible a été imaginé pour se substituer au combustible classique à uranium enrichi en U²³⁵ (3,5 % contre 0,71 % dans l'uranium naturel) dans les réacteurs à eau ordinaire et uranium enrichi (PWR et BWR). Ce nouveau combustible, appelé MOX³ (oxyde mixte d'uranium et de plutonium : UO₂-PuO₂), contient de l'uranium appauvri en U²³⁵ et en moyenne 7 % de plutonium (5 à 12,5 % suivant la position dans le cœur)⁴. Superphénix ayant été définitivement arrêté et la filière abandonnée, le MOX s'est trouvé être le « débouché » pour 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 2012, dont 37,8 t appartiennent à la France). Fin 2012, la France disposait d'un total de 52,5 tonnes de plutonium (La Hague, usine Mélox de fabrication du combustible MOX à Marcoule, combustible MOX neuf entreposé dans les réacteurs EDF, ainsi que sur le site de l'usine de fabrication de MOX à Marcoule).

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 stockage à sec des combustibles MOX usés est beaucoup plus long que celui des combustibles UO₂ et ces combustibles ne sont pas retraités⁵ (il reste en fin de vie du combustible environ 6,7 % de plutonium pour un MOX à 8,65 %). On estime généralement qu'il faut entreposer 60 ans un combustible irradié à base d'uranium avant stockage définitif mais 150 ans un combustible MOX irradié. Durant l'entreposage sous eau, les piscines doivent être en permanence refroidies par des échangeurs.

Du combustible MOX est utilisé dans 22 réacteurs en France. Le rechargement annuel des réacteurs avec du combustible MOX est d'environ 7,4 tonnes par réacteur et par an. De 2006 à fin 2010, 740 tonnes de MOX ont été déchargées.

Fin 2011, l'entreposage dans les piscines de La Hague de combustibles irradiés issus des réacteurs à eau était de 9 709 tonnes, dont 1 140 tonnes de MOX. Fin 2012, la quantité de combustibles usés a atteint 9 790 tonnes. La capacité de ces piscines a été portée de 12 000 à 18 000 tonnes, après renforcement de la protection neutronique des « paniers » contenant les combustibles.

Du combustible MOX avait été chargé récemment dans des réacteurs japonais, dont le réacteur 3 de la centrale de Fukushima au Japon (32 assemblages MOX sur 548), aujourd'hui très gravement accidenté. L'exploitant TEPCO estime qu'environ 70 % du combustible du réacteur n° 3 a fondu.

2 - Après le démarrage d'une usine de retraitement pilote d'une capacité de 100 t/an (Tokai Mura) en 1977, le Japon devait également démarrer à Rokkasho une usine de retraitement construite depuis avril 1993 par Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL) avec l'appui industriel d'AREVA. Ce complexe industriel produirait du combustible MOX à partir du plutonium fourni par l'usine de retraitement (800 t/an). 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. Les reports de démarrage se sont multipliés et il était question récemment de mi-2015.

3 - Les surgénérateurs fonctionnent aussi avec un MOX dont le contenu en Pu est beaucoup plus élevé (>20 %).

4 - 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 % par un renouvellement par quart de cœur. Elle devrait passer à 9,5 %. La teneur maximale d'un assemblage est de 12 %.

5 - Entre 1998 et 2009 les usines de La Hague ont retraité 68,5 tonnes de MOX alors que dans le même temps, 12 445 tonnes de combustibles UO₂ ont été retraitées. Le retraitement des MOX ne concerne que 0,55 % de l'ensemble des combustibles retraités et n'a été effectué qu'à titre de démonstration de la faisabilité technique.

Panorama international : nature et origine de l'impasse plutonium et quelques options de sortie

Frank von Hippel - Program on Science and Global Security, Princeton University
- Co-chair, International Panel on Fissile Material (IPFM).

Distribution internationale des stocks de plutonium

Il existe actuellement environ 500 tonnes de plutonium séparé, essentiellement en France, Japon, Russie, Royaume-Uni et États-Unis

Tableau 1 : Stocks de plutonium dans les 5 principaux pays

Tonnes	France	Japon	Russie	Royaume-Uni	Etats-Unis
TOTAL, dont	62,0	35,6	170,4*	95,3	91,9
Stocks civils	56,0	35,6	48,4	87,7	
<i>dans le pays**</i>	56	0,9	48,4	86,8	
<i>à l'étranger</i>		35		0,9	
Stocks militaires	6		122	7,6	91,9
<i>stratégiques</i>			34	4,4	53,9
<i>supplémentaires</i>					
<i>excédentaires</i>	6		88*	3,2	38
<i>aux besoins de défense</i>					

Tableau 2 : Stocks de plutonium des autres pays et total général du stock de plutonium mondial

Tonnes	Chine	Allemagne	Inde	Israël	Corée du Nord	Pakistan	Autres	TOTAL général
TOTAL, dont	1,8*	7,6	4,7*	0,82*	0,03*	0,13*	10,7	480,5
Stocks civils		7,6	4,2*				10,7	250,5
<i>dans le pays**</i>		5,6	4,2*					201,9
<i>à l'étranger</i>		2						48,6
Stocks militaires	1,8*		0,5	0,82*	0,03*	0,13*		230,8
<i>stratégiques</i>					0,03*	0,13*		92,5
<i>supplémentaires</i>								
<i>excédentaires</i>	1,8*		0,5	0,82*				138,3
<i>aux besoins de défense</i>								

* : estimations (incertitude de plus ou moins 8 t pour le stock en Russie).

** : plutonium séparé pour utilisation éventuelle comme combustible.

La quantité totale de plutonium séparé, disponible dans les stocks civils et militaires, est de l'ordre de 500 tonnes. Un tel potentiel permettrait de fabriquer plusieurs dizaines de milliers d'armes nucléaires, soit de première génération du type de la bombe qui a détruit Nagasaki (8 kg de plutonium de qualité réacteur), soit d'un modèle moderne (4 kg). Il convient également de noter que le plutonium civil sous forme d'oxyde (combustible MOX par exemple) peut être converti chimiquement en métal avant utilisation dans un engin explosif.

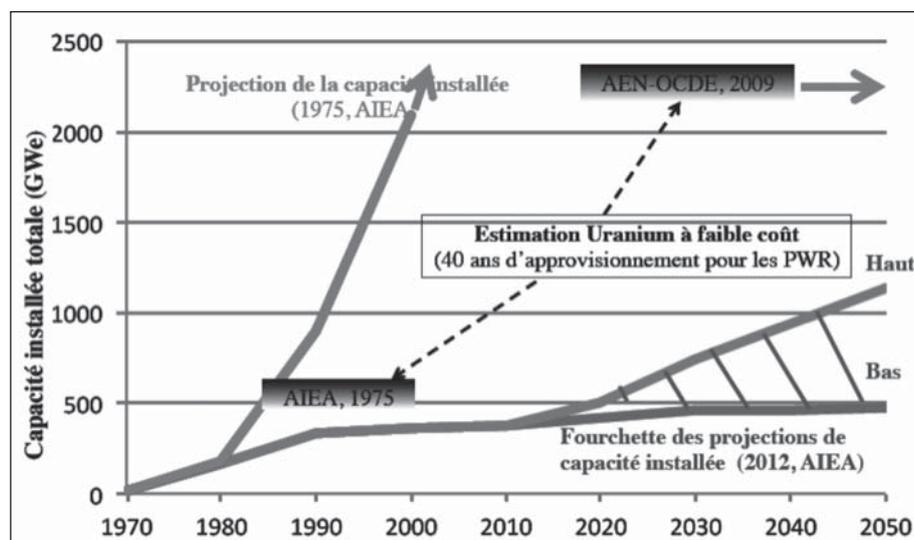
La production du plutonium à des fins civiles est-elle intéressante ?

En 1975, les prévisions de l'AIEA¹ concernant le développement de la production d'électricité d'origine nucléaire étaient très élevées (voir graphique ci-dessous) : on atteindrait environ 2 500 GW² en 2000. Dans ces conditions, on considérait que les ressources mondiales en uranium ne permettraient pas d'alimenter à long terme les réacteurs à eau légère. La pression sur le marché de l'uranium devait alors conduire à une augmentation considérable des coûts justifiant le développement de la production de plutonium par le retraitement des combustibles irradiés et le développement des surgénérateurs et plus tard celui du combustible MOX.

Avec les années, les réalisations comme les prévisions de capacités (puissances) installées de l'AIEA (et de l'AEN, Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE) ont subi des révisions drastiques, comme le montre le même graphique.

Aujourd'hui, le coût de l'uranium naturel ne représente que quelques pour cent du coût du kWh produit par les centrales nucléaires : le recyclage du plutonium dans les éléments combustibles comme la filière des surgénérateurs au plutonium ne sont pas rentables.

Figure 1 : Les prévisions de la capacité nucléaire installée dans le monde



Retraitement et production de plutonium dans le monde

La plupart des pays ont opté pour le stockage des combustibles irradiés en l'état, après leur déchargement du réacteur. Ils sont en général entreposés dans des « piscines » situées auprès des réacteurs (à l'extérieur ou à l'intérieur des enceintes de confinement). Dans certains pays, ils sont transférés après quelques années en stockage à sec.

En France, en Inde et en Russie, les gouvernements restent engagés dans le retraitement des combustibles irradiés et donc dans la production de plutonium. En Chine, au Japon, aux Pays-Bas et en Ukraine, la question du retraitement est en débat.

Le retraitement dans le monde

Il existe des quantités considérables de plutonium séparé comme le montre le tableau suivant :

	Fin 2011: Pu civil et en excès des armes	Stratégie de gestion
France	80 t (dont 23 étrangères)	MOX REL, opérationnelle
Japon	9 t (+35 en France/UK)	MOX REL au point mort Début retraitement en 2014
Russie	82 tonnes	Recyclage dans des plutonigènes
U.K.	118 t (dt 28 étrangères)	Usine MOX abandonnée
U.S.	49 tonnes	Usine MOX peut-être abandonnée
Total	340 tonnes (équivalent 40.000 à 85.000 bombes nucléaires)	

1 - L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) – International Atomic Energy Agency (IAEA) – est une organisation internationale, sous l'égide de l'ONU. Elle rend un rapport annuel à l'assemblée générale de l'ONU et à chaque fois que demandé par le Conseil de sécurité. Fondée en 1957 et basée à Vienne, elle cherche à promouvoir les usages pacifiques de l'énergie nucléaire et à limiter le développement de ses applications militaires. Ce double rôle entraîne des ambiguïtés sur ses interventions.

2 - GW : Gigawatt (milliard de watts) ou 1 000 MW (mégawatt ou million de watts). C'est la puissance électrique moyenne des tranches nucléaires.

L'utilisation de ce plutonium pour fabrication de MOX ou de combustible pour surgénérateur, ou son stockage sans danger prendront des décennies dans certains cas. Pourquoi dans ces conditions continuer à en séparer ?

- **Le retraitement, un procédé coûteux, non fiable et dangereux**

Les figures suivantes illustrent ce propos ainsi que les échecs du retraitement dans la plupart des pays.

- **Le retraitement est coûteux (estimations officielles) :**

Augmentation des coûts d'exploitation sur la durée de vie d'un réacteur par rapport au non-retraitement :

- France (2000) : 0,5 milliard de dollars US par GWe.
- Japon (2011) : 3 milliards de dollars US par GWe

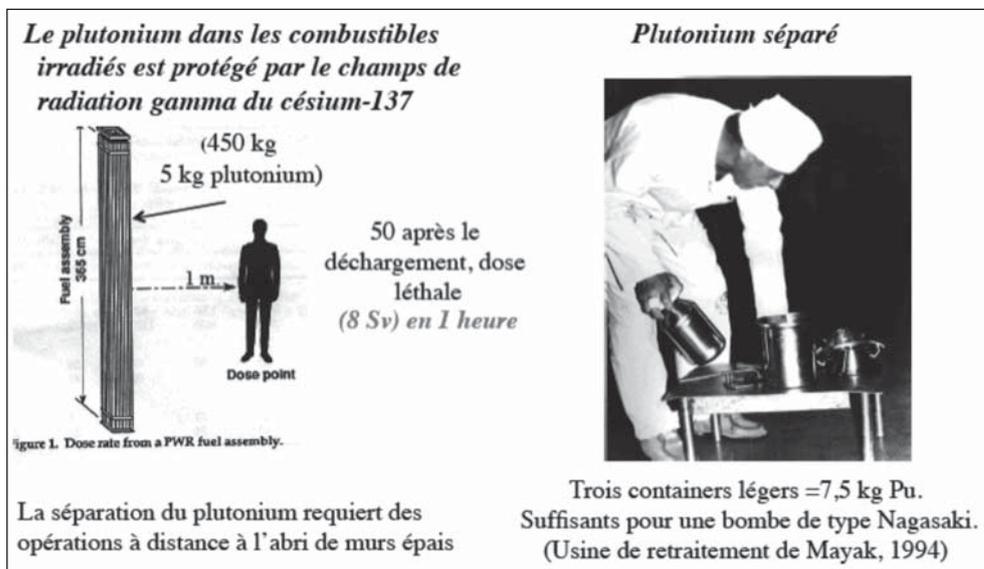
- **Le retraitement n'est pas fiable (hors France) :**

- Japon : l'exploitation de l'usine de retraitement de Rokkasho actuellement en retard de 16 ans.
- Royaume-Uni : le fonctionnement de l'usine de retraitement britannique THORP n'a pas dépassé en moyenne 50 % de sa capacité.

- **Le retraitement est dangereux**

Figure 2 : Le retraitement amplifie la menace de prolifération et de terrorisme

(bombe de Nagasaki : 8 kg ; inhalation collective d'1 kg de PuO_2 ~ 10 000 morts par cancer).



- **Échecs et impasses des programmes MOX**

De nombreux programmes MOX sont dans l'impasse comme au Japon ou aux États-Unis

- a) Échec des directives de l'AIEA de 1997 relatives à la gestion du Pu (directives signées par la France, le Japon, la Russie et les États-Unis, la Belgique, la Chine, l'Allemagne et la Suisse):
- « (Nous nous engageons à gérer le plutonium dans des stratégies (...) qui en garantiront l'utilisation pacifique ou l'évacuation sûre et durable (...)) »

La formulation de cette stratégie devra prendre en compte :

- « la nécessité d'éviter de contribuer aux risques de prolifération nucléaire » (certains pays s'intéressent encore au retraitement, car c'est un chemin vers la bombe).
- « les coûts et les bénéfices en jeu » (coûts élevés, bénéfices négligeables).
- « l'importance d'équilibrer l'approvisionnement et la demande » (250 tonnes de Pu civil permettraient plus de 30 000 armes nucléaires).

- b) L'impasse du MOX au Japon :

- 9 tonnes de plutonium séparé au Japon, plus 35 tonnes issues de combustibles usés japonais en France et au Royaume-Uni.
- Mais une opposition massive à l'utilisation du MOX : seules 2,5 tonnes sur les 40 tonnes de plutonium séparées en Europe des combustibles irradiés japonais ont été chargées au Japon sous forme de combustible MOX depuis le premier transport en 1999. Tous les réacteurs japonais, à l'exception de deux, sont à l'arrêt, mais AREVA prévoit un nouveau transport de MOX pour avril 2013.

- Le début de la séparation de plutonium supplémentaire à l'usine de retraitement de Rokkasho (RRP) est prévu en 2014, avec montée en puissance jusqu'à 8 tonnes par an (équivalent à 1 000 bombes) d'ici 2018.
- Si RPP est mise en service et que les transports depuis la France se poursuivent, le stock de plutonium non irradié au Japon va croître rapidement.

c) L'échec du plan américain d'évacuation du plutonium via le MOX :

- En 2002, la COGEMA (aujourd'hui AREVA) estimait un coût de 2 milliards de dollars pour évacuer 34 tonnes de plutonium de qualité militaire via le MOX entre 2007 et 2019.
- En 2013, 4 milliards de dollars ont été déjà dépensés et les besoins sont estimés à :
 - 3 milliards de dollars supplémentaires pour terminer l'installation et,
 - 10 milliards de dollars pour l'exploitation entre 2019 et 2039.

Avec la crise fiscale à Washington, le projet pourrait être gelé pendant que l'on étudie les alternatives.

• Des alternatives pour l'immobilisation du plutonium ?

Différentes solutions sont présentées pour immobiliser les quantités de plutonium déjà séparé.

Figure 3 : L'immobilisation du Pu comme alternative au MOX

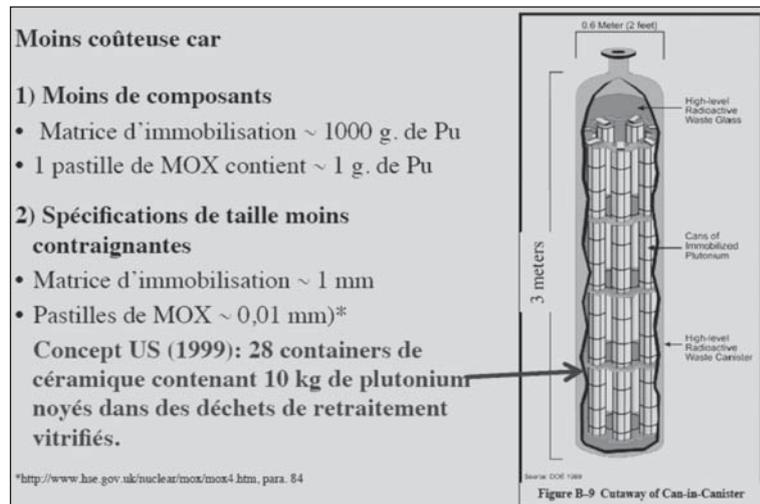


Figure 4 : Les pastilles de MOX pourraient être stockées dans des puits profonds

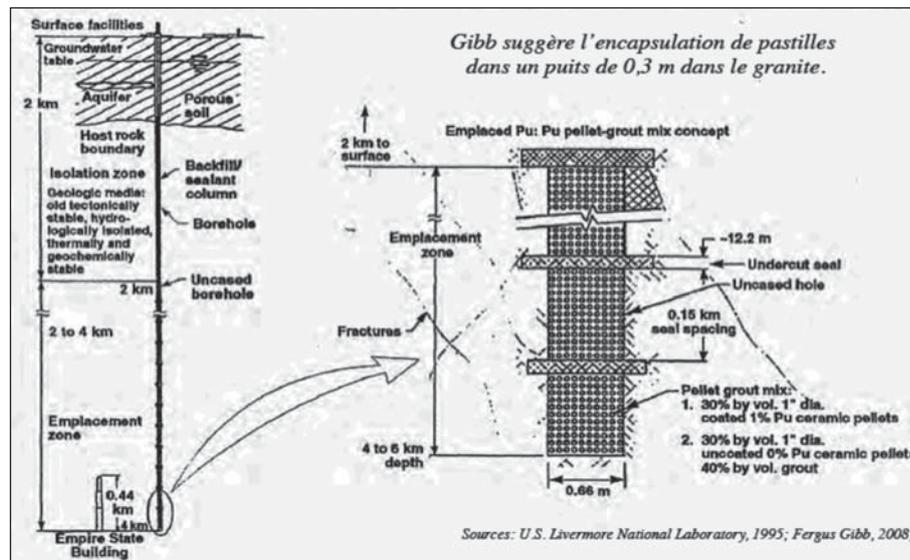
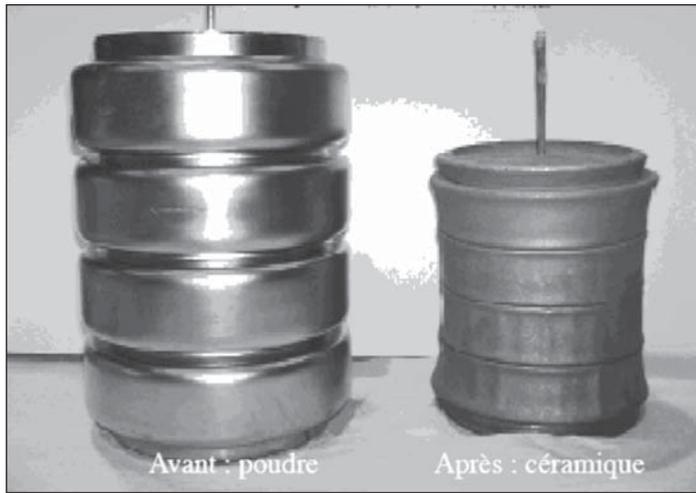
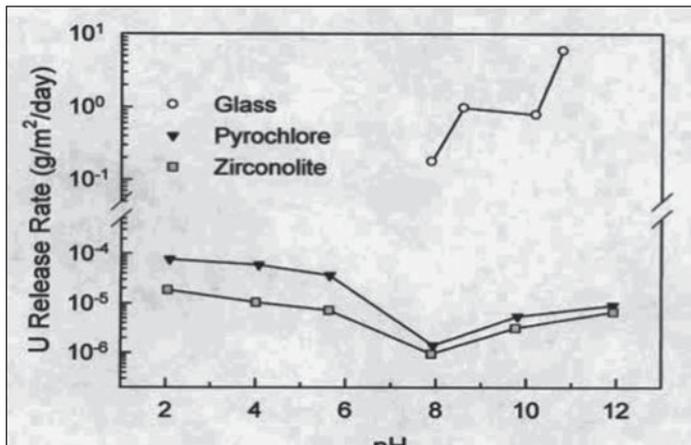


Figure 5 : Processus d'immobilisation pour le plutonium impur (UK) : Compression isostatique à chaud (~ 2 kg de Pu par container à 10 wt %, National Nuclear Lab, Sellafield)



- Des alternatives au retraitement ?

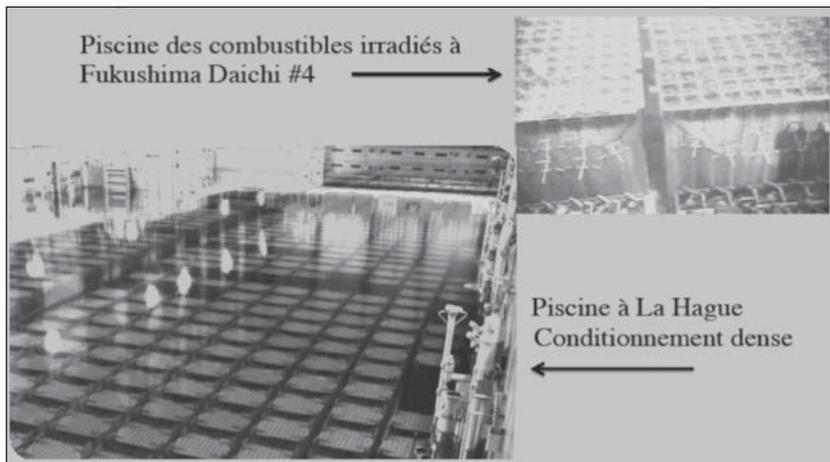
Figure 6 : Des matrices céramiques pour l'immobilisation avec une solubilité de plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle du verre ont été développées.



Source : WJ. weber and R.C. Ewing (in press) « Ceramic waste forms for uranium and transuranium elements », Mineralogical Association of Canada Short Course, vol. 48.

Le stockage des combustibles irradiés en piscine présente des risques importants en particulier si le conditionnement y est dense comme à la Hague.

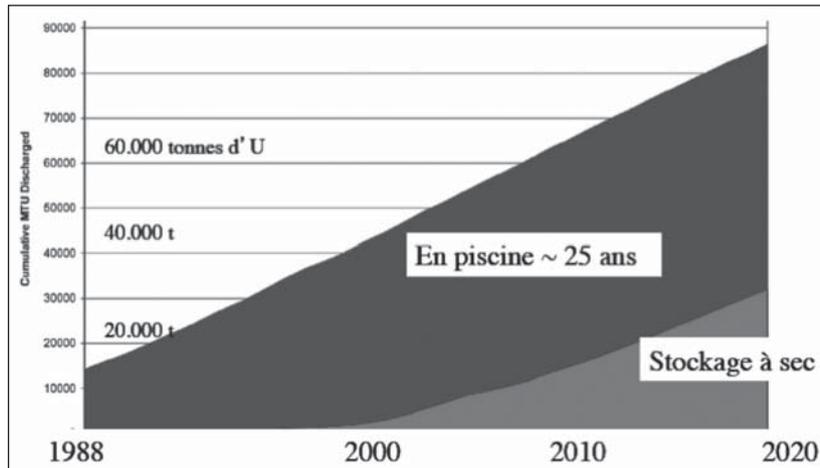
Figure 7 : Les piscines sont dangereuses - en particulier avec un conditionnement dense. Le combustible irradié doit être transféré dans des containers à sec au bout de cinq ans.



Les assemblages combustibles usés sont regroupés (9, 12 ou 16) dans des « paniers » afin d'assurer leur manipulation lors de déplacements sous eau, dans la piscine. La protection contre le risque de criticité, dans les piscines d'entreposage d'EDF ou de La Hague, consiste en la séparation des assemblages entre eux par une lame d'eau suffisante ou par des matériaux riches en bore. Dans ce dernier cas, il est possible de réduire l'espace qui sépare les assemblages. La densité du stockage dans la piscine est ainsi augmentée.

En cas de malveillance (explosion, projectile) détruisant l'arrangement des assemblages, si une partie de quelques dizaines de centimètres de deux assemblages venait à entrer en contact, cela déclencherait un accident grave de criticité.

Figure 8 : Les piscines de presque tous les réacteurs américains actuels sont pleines.



Categorization of Used Nuclear Fuel Inventory in Support of a Comprehensive National Nuclear Fuel Cycle Strategy, ORNL/TM-2012/308.

Les combustibles plus anciens et refroidis sont transférés vers du stockage à sec afin de libérer la place pour les combustibles chauds que l'on décharge. Débat sur le conditionnement dense.

Figure 9 : L'alternative au retraitement

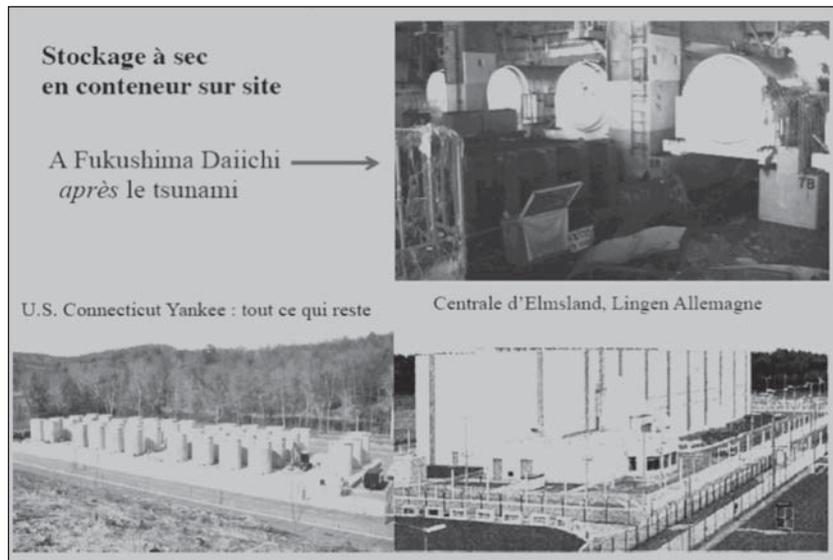


Figure 10 : Centrale de Surry (1973, REP 2x0,84 GWe)
Première centrale américaine à adopter le stockage à sec (1986)

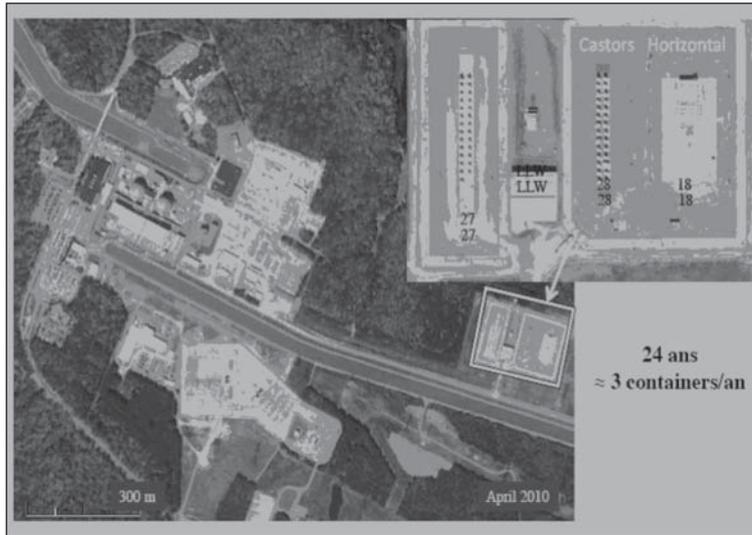
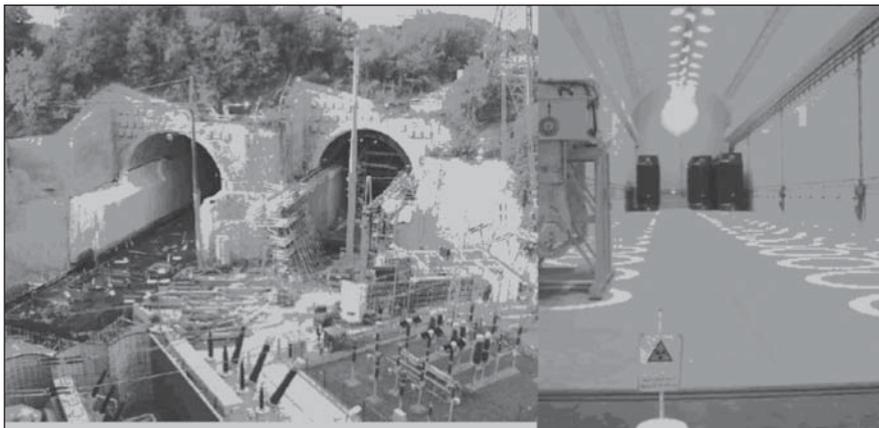


Figure 11 : Même sur les petits sites, le stockage près des réacteurs est possible.
(Galerie de stockage sous les bâtiments administratifs, Neckar-Westheim, Allemagne, 2006)



Conclusions

- Pour des raisons de coût et de non-prolifération, la tendance est à l'abandon de la séparation du plutonium. Seuls cinq pays, sur les trente et un possédant des centrales nucléaires, ont encore recours au retraitement des combustibles irradiés.
- Le stockage en profondeur des combustibles irradiés et des déchets du retraitement a subi des retards dans de nombreux pays.
- Le stockage à sec en conteneurs des combustibles irradiés est une stratégie intermédiaire sûre et à faible coût.
- Le recours à l'immobilisation pour l'évacuation du plutonium séparé est une alternative à faible coût au MOX.

L'échec de l'industrie du plutonium au Royaume-Uni

Gordon Mac Kerron - Director, Science Policy Research Unit (SPRU), University of Sussex, United Kingdom.

Les origines

Le site de Windscale, rebaptisé ultérieurement Sellafield, était à l'origine une installation militaire produisant du plutonium pour les armes¹.

Les réacteurs nucléaires de production de plutonium ont ensuite constitué la base du programme de production d'électricité d'origine nucléaire (réacteurs Magnox²) jusque dans les années 1960.

Le combustible (uranium métal) irradié était stocké – et se corrodait – en piscine. La séparation du plutonium (par le retraitement) semblait nécessaire pour des raisons de sûreté. L'alternative de l'entreposage à sec n'a jamais été explorée sérieusement.

La motivation sous-jacente était de produire du plutonium pour le succès jugé « indiscutable » des surgénérateurs³, avec un besoin de plusieurs tonnes de plutonium pour le premier cœur.

Les développements jusqu'en 1976

La principale installation de retraitement des combustibles Magnox, B205, ouverte en 1962, est toujours en service, mais doit s'arrêter vers 2016 avec le retraitement des derniers combustibles Magnox, ce qui réduira considérablement les rejets de Sellafield.

Depuis le milieu des années 1970, les réacteurs plus récents ont utilisé des combustibles oxydes⁴ que les installations existantes ne pouvaient pas retraiter.

D'où le projet de construire une usine destinée au retraitement des combustibles oxydes, qui deviendra THORP.

Au moment de l'enquête publique de THORP, en 1976-77, les perspectives officielles étaient de 30 000 MW de puissance électrique de surgénérateurs à l'horizon 2000.

L'argument décisif en faveur de THORP a été les importants contrats japonais⁵, même si on espérait une forte demande britannique.

1 - Windscale est débaptisé et devient Sellafield après l'accident de 1957. L'accident se produit dans l'un des réacteurs graphite gaz à uranium naturel du site. Lors d'une opération d'entretien du graphite, un incendie se produit et dure plusieurs jours, pendant lesquels des produits de fission, essentiellement 740 téra-becquerels (740 mille milliards de becquerels) d'iode 131, sont rejetés à l'extérieur. Le nuage radioactif parcourt ensuite l'Angleterre, porté par les vents, puis touche le continent sans que la population ne soit avertie. L'accident de Windscale se classe au niveau 5 sur l'échelle internationale des événements nucléaires (INES).

Le site de Sellafield est le principal complexe de la filière électronucléaire britannique. Situé sur la côte de la mer d'Irlande dans le comté de Cumbria au nord-ouest de l'Angleterre, il comprend aujourd'hui 400 bâtiments répartis sur 10 km² et emploie environ 10 000 personnes.

2 - Magnox : filière de réacteurs à uranium naturel, graphite, gaz (CO₂), du même type que ceux développés en France, d'abord pour la production de plutonium à usage militaire, puis pour la production d'électricité (centrales EDF des années 1960).

3 - Réacteurs à neutrons rapides, combustible d'uranium appauvri et de plutonium, refroidis au sodium liquide.

4 - Réacteurs AGR (Advanced gas cooled reactors) à modérateur graphite, fluide caloporteur CO₂ et combustible constitué de pastilles de dioxyde d'uranium (UO₂) d'enrichissement compris entre 2,5 et 3,5 %.

5 - Pour le retraitement de combustibles d'oxyde d'uranium de réacteurs à eau et uranium enrichi (PWR et BWR).

L'ère THORP

La construction de THORP a été lente et l'usine n'a été achevée qu'en 1994. Mais le Royaume-Uni avait alors abandonné le développement des surgénérateurs⁶ - il n'y avait qu'un seul réacteur de démonstration de 250 MW de puissance électrique – et aucune perspective de construction d'un surgénérateur commercial.

THORP a fonctionné de façon erratique (environ 50 % de sa capacité), avec comme effet de ralentir la réalisation des premiers contrats étrangers.

Depuis la signature des contrats étrangers d'origine, et quelques extensions de contrats domestiques acquises par pression politique, les nouvelles commandes se sont tariées. Il n'y a eu aucun nouveau contrat THORP depuis plus de dix ans.

La *Nuclear Decommissioning Authority* (NDA)⁷, désormais propriétaire de THORP, a annoncé la fermeture de THORP pour 2018.

Pourquoi fermer THORP ?

Malgré une exploitation incertaine, l'usine THORP pourrait fonctionner au-delà de 2018 moyennant des travaux de réfection.

Mais, en l'absence de nouveaux contrats étrangers, son exploitation eut alors reposé sur la seule demande britannique.

Le nucléaire britannique (en exploitation et en projet) est soumis à la discipline commerciale normale et le combustible utilisant du plutonium (MOX) est cher et difficile à gérer.

Ainsi, on ne retraite plus les combustibles des réacteurs existants et les futurs développeurs de réacteurs n'affichent aucun intérêt pour le retraitement ou les combustibles au plutonium.

De plus, si l'on devait un jour fabriquer du MOX, il existe un énorme stock de plutonium séparé que l'on pourrait alors utiliser.

La « vieille » histoire du MOX

Après 1990, alors qu'il était évident que les surgénérateurs n'étaient plus à l'ordre du jour, le gouvernement britannique et BNFL⁸ ont décidé de produire du MOX pour les réacteurs thermiques comme moyen de renvoyer le plutonium aux clients étrangers de THORP.

À la suite de cette décision, une usine de démonstration, SMP (*Sellafield MOX Plant*) fut construite. Ce fut une catastrophe technique et l'usine a été fermée par la NDA après n'avoir fourni que 1 % environ de la production totale attendue.

En conséquence, avec les usines B205 et THORP toujours en service, les stocks de plutonium séparé ont continué et continuent de croître fortement.

Ainsi, le Royaume-Uni est le détenteur des plus grands stocks civils de plutonium au monde (environ 118 tonnes).

La « nouvelle » histoire du MOX

Le gouvernement britannique et la NDA ont commencé à prendre au sérieux la question de l'évacuation du plutonium. Ils ont mis en place plusieurs séries de consultations publiques et la NDA a publié une étude sur les « options crédibles » (« *Credible options study* »)⁹ fortement épurée et presque totalement vide de chiffres.

6 - Le site de *Dounreay* à l'extrême nord de l'Écosse a abrité deux prototypes de réacteurs à neutrons rapides :

- *DFR* (*Dounreay Fast Reactor*) qui a divergé juste après en 1959. D'une puissance électrique de 14 MWe, ce réacteur a cessé de fonctionner en 1977. Il était refroidi par un alliage de sodium et de potassium liquide.

- *PFR* (*Prototype Fast Reactor*) qui a divergé près de 20 ans plus tard en 1974 et fonctionné jusqu'en 1994. Ce réacteur était refroidi au sodium liquide et alimenté en combustible MOX.

7 - L'Autorité britannique de démantèlement nucléaire (en anglais *Nuclear Decommissioning Authority* ou *NDA*) est une organisation publique du Royaume-Uni créée le 1^{er} avril 2005 suite à la loi *Energy Act* en 2004. Son objectif est de superviser et de gérer le démantèlement et le nettoyage des sites nucléaires britanniques.

8 - *British Nuclear Fuels Limited* ou *BNFL* était une entreprise productrice d'électricité britannique fondée en 1971 à partir de la division production de l'Autorité britannique de l'énergie atomique. Elle exploitait des centrales nucléaires pour produire et vendre de l'électricité. Cette société produisait et transportait du combustible nucléaire (en particulier le MOX), retraitait le combustible usé, (principalement à *Sellafield*), gérait les déchets radioactifs et le démantèlement des centrales nucléaires et autres équipements similaires. En mai 2009, *BNFL* a finalisé la vente de tous ses établissements et a cessé ses activités ; mais continuait cependant d'exister en tant qu'entité légale afin d'honorer ses engagements vis-à-vis des retraites et du démantèlement de ses installations nucléaires. En octobre 2010, *BNFL* a cessé d'exister.

9 - *NDA – Plutonium – Credible options Analysis (gate A) 2010*.

Officiellement, le coût des options MOX ou immobilisation¹⁰ du plutonium seraient de l'ordre de 3 milliards de livres¹¹ chacune, les coûts de la solution MOX étant compensés à hauteur de 1 milliard de livres par sa valeur marchande.

La position la plus récente du gouvernement serait alors de favoriser la réutilisation du plutonium, avec le MOX comme choix évident, cette prise de décision se fondant prétendument sur des bases économiques.

Les problèmes liés à la nouvelle histoire du MOX

Il n'existe pas de données publiques concernant la base des estimations de coût global pour la solution MOX ou la solution immobilisation, ce qui rend impossible toute vérification. Et l'expérience actuelle concernant les coûts de la solution MOX aux États-Unis est très faible.

Avec les retards du développement de nouveaux réacteurs au Royaume-Uni, il n'y a pas de marché en vue pour le MOX, à part (probablement de façon irréaliste) pour l'exportation. Et la valeur du MOX est probablement très faible.

La recherche sur l'immobilisation ne porte actuellement que sur les quelques 10 % de plutonium trop contaminé pour être utilisable dans du MOX. Cela pourrait être étendu aux 90 % restants, dont la manipulation serait plus simple.

Cette solution serait probablement moins onéreuse et présenterait de meilleures caractéristiques que la solution MOX en termes de résistance à la prolifération, de solvabilité et d'acceptation publique.

La problématique a été encore compliquée par l'offre de GE-Hitachi¹² d'un réacteur surgénérateur PRISM¹³ comme « brûleur » de plutonium, option qui paraît très peu plausible.

Conclusions

Alors que les performances techniques de THORP sont médiocres, la fin du retraitement résulte principalement d'une application stricte des règles de l'économie de marché.

Le soutien officiel à la réutilisation des stocks de plutonium, probablement sous forme de MOX, se poursuit. Mais le désastre de l'histoire britannique de l'industrie du plutonium, comme les problèmes actuels du MOX aux États-Unis, laissent plutôt présager une voie très coûteuse.

L'option de l'immobilisation du plutonium commence à être reconnue. Elle se défend bien sur le terrain de la prolifération et sur celui de l'acceptation publique. En outre, elle a de fortes chances d'être moins onéreuse.

10 - Immobilisation du plutonium : voir notamment « La fin de l'économie du plutonium : la gestion des stocks mondiaux de plutonium séparé, commercial et militaire, utilisable pour les armes atomiques » par Arjun Makhijani - septembre 2000 (www.ieer.org).

11 - 1 livre vaut environ 1,20 euro.

12 - GE-Hitachi Nuclear Energy Ltd. (GEH).

13 - PRISM : « Power Reactor Innovative Small Modular » est un surgénérateur au plutonium refroidi au sodium.

Les combustibles MOX d'EDF : Radiotoxicité et bilans thermiques, production et stockages, bilans 2011

Jean-Claude Zerbib et André Guillemette

- Respectivement : Ingénieur radioprotection, ancien du CEA - Ingénieur, ancien de la DCN, Cherbourg.

Radiotoxicités

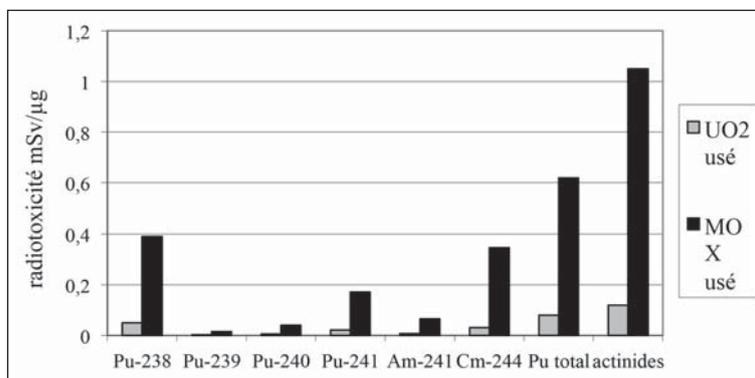
AREVA annonce que¹ « Le recyclage diminue jusqu'à 10 fois la toxicité intrinsèque des déchets grâce au recyclage du plutonium », le recyclage, étant l'utilisation du plutonium (Pu) extrait des combustibles usés des réacteurs à eau du parc nucléaire d'EDF comme matériau combustible de ces mêmes réacteurs.

Voyons ce qu'il en est.

Toxicité comparée des isotopes du plutonium et des actinides mineurs dans des combustibles neufs UO_2 et MOX

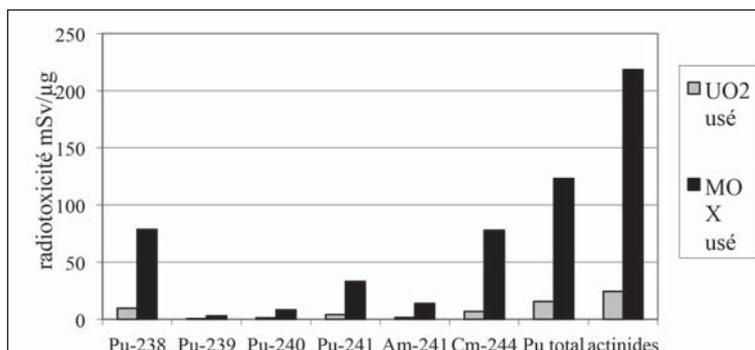
a) La radiotoxicité par inhalation d'aérosols est 9 fois supérieure pour le combustible MOX usé à celle du combustible UO_2 usé.

Figure 1 : Radiotoxicités comparées UO_2 et MOX usés, par inhalation d'aérosols



b) La radiotoxicité par ingestion est 8,8 fois supérieure pour le combustible MOX usé à celle du combustible UO_2 usé.

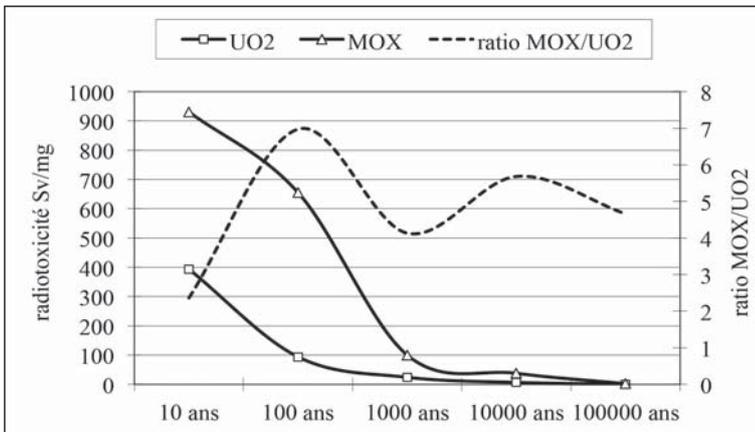
Figure 2 : Radiotoxicités comparées UO_2 et MOX usés, par ingestion



1 - Source : « Traitement des combustibles irradiés étrangers », AREVA NC La Hague, rapports 2007 à 2011.

c) Évolution comparée de la radiotoxicité par inhalation

Figure 3 : Évolution comparée de la radiotoxicité par inhalation de combustibles UO_2 et MOX usés à 45 MWj/tonne (Source : AEN OCDE 2006)



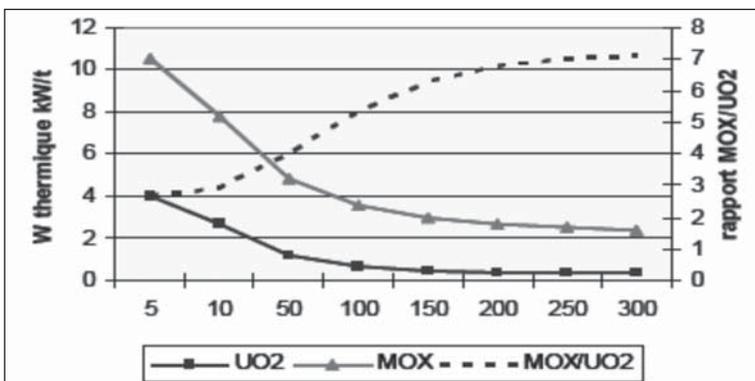
Thermiques comparées des combustibles UO_2 et MOX

a) Ce sont les actinides qui font la différence :

Si les quantités de produits de fission sont comparables (puisque l'énergie dégagée par les combustibles est la même et qu'elle est proportionnelle au nombre de fissions) ce sont les teneurs élevées en plutonium (Pu), américium (Am), curium (Cm) et neptunium (Np) dans le MOX qui font la différence.

b) La thermique (la chaleur dégagée) des combustibles MOX usés est 2 à 7 fois plus importante que celle des UO_2 (45 GWj/tonne, après 3 ans de refroidissement).

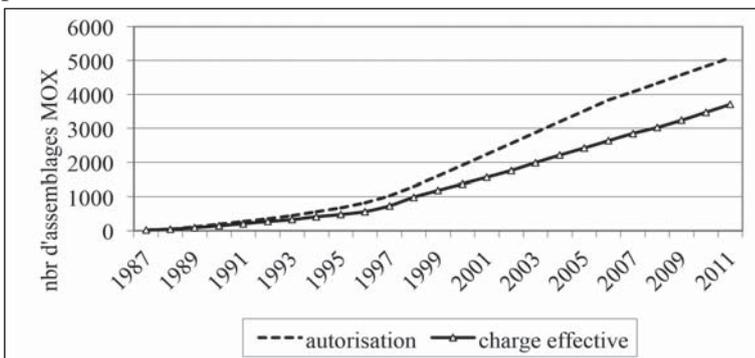
Figure 4 : Combustibles UO_2 et MOX usés, 65 GWj/tonne



Les quantités de combustible MOX

a) Historique du combustible MOX dans les réacteurs d'EDF.

Figure 5 : combustible EDF 3700 assemblages MOX chargés dans les réacteurs d'EDF sur la période 1987-2011

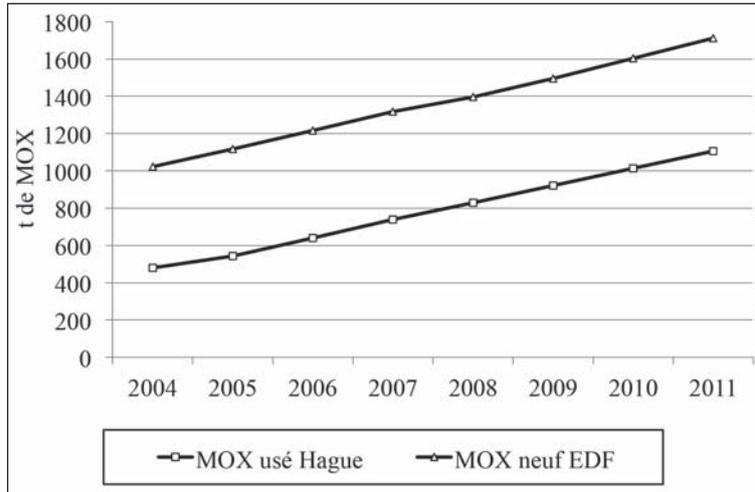


b) Stockage des combustibles MOX à La Hague (données publiques et données reconstituées-

Tableau 1 - Stockages à La Hague, données 2003-2011

Combustible	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
UO2		7156	7410						
URT		155	172						
MOX usé la Hague		479	543	680	728	840	940	1040	1140
données MOX EDF	450	550	600	700	800	900		1100	
Total REP		7790	8125		8831	9170	9421	9539	
Stock de Pu EDF/Pu total					29/61	?/62	?/60	27/60	?/57

Figure 6 : Évolutions MOX neuf EDF et MOX usé à La Hague



c) Bilans 2011

- Bilans MOX fin 2011 à La Hague : MOX usé 1 140 tonnes et rebuts MOX environ 96 à 120 tonnes.
- Bilans MOX fin 2011 à EDF : 390 tonnes en piscines et 300 tonnes chargées dans 21 réacteurs.

d) La « transparence » de l'information.

Fig 7 MOX et Plutonium : exemple de données « publiques » où les chiffres sont néanmoins barrés par souci de confidentialité.

Le tableau 5.1-1 ci-dessous présente les quantités de matières transmises par EDF, pour la fin des années 2003 et 2008, comparées aux estimations réalisées par l'IRSN (cf. chapitre 5.1.5 du présent rapport).

Matières gérées par le cycle du combustible	Quantités au 31 décembre 2003 ⁽¹⁾		Quantités au 31 décembre 2008 ⁽¹⁾	
	Données EDF ⁽²⁾ (tUO2)	Estimations IRSN ⁽³⁾ (matrices globales)	Données EDF ⁽²⁾ (tUO2)	Estimations IRSN ⁽³⁾ (matrices globales)
Plutonium (diverses formes liquides)	████████	████████	████████	████████

Tableau 5.1.1 : Etat des stocks de matières présentés par EDF et quantités de matières estimées par l'IRSN

Le tableau 6.3-2 présente la situation des piscines NPI, C, D et E de l'établissement de La Hague au 31 décembre 2009. Il conviendrait d'y ajouter les combustibles RTM (réacteur de test et de recherches), dont ██████████ sont entreposés dans la piscine NPI en attente de traitement.

	NPI	C	D	E	Total
Capacité totale ⁽⁴⁾ (tUO2)	2 000	4 800	4 600	6 200	17 600
Combustibles MOX non usés (tUO2)	████████	████████	████████	████████	████████
Combustibles MOX usés (tUO2)	████████	████████	████████	████████	████████
TOTAL	████████	████████	████████	████████	████████

⁽⁴⁾ Capacités totales définies par décret du 10 janvier 2003 (ne correspondent pas aux capacités opérationnelles)
 Note : l'équivalent en masse par panier est de ██████████

Tableau 6.3.2 : Etat des entreposages d'assemblages combustibles dans les piscines NPI, C, D et E de l'établissement de La Hague

IRSN,
Cycle du combustible REP français
Rapport DSU n° 228
30 juin 2010
Évolutions envisagées pour la période
2007-2017 par EDF, AREVA et
l'ANDRA

(Convention de confidentialité sur les données contenues dans ce rapport)

L'importance des problèmes posés par le MOX

- a) Fin 2011, 3 700 assemblages de MOX ont été utilisés². Cela représente 1 700 tonnes de ce type de combustible, chargées dans les réacteurs d'EDF depuis 1987, contenant environ 120 tonnes de plutonium (équivalent de 23,6 cœurs à 100 % MOX de 157 assemblages/cœur).
- b) 1 140 tonnes de MOX usés sont stockées fin 2011 à La Hague et 300 t dans les piscines des réacteurs, du fait de l'utilisation de ces 1 700 tonnes. Les combustibles MOX représentent près de 12 % de l'ensemble des combustibles usés entreposés à La Hague

Ces combustibles contiennent 61,4 tonnes de plutonium³ (valeur résiduelle dans les combustibles MOX usés).

- c) Fin 2011, il y avait 57 tonnes de plutonium séparé (sous la forme de PuO₂ : oxyde de plutonium) entreposées à La Hague, dont 36,2 t appartenant à la France (16,1 t au Japon et 4,6 t à l'Italie).

Le Bilan retraitement-recyclage : un autre regard

Le retraitement-recyclage réduit la masse de plutonium de 23 % par rapport à sa valeur dans les combustibles usés, mais, comparé au combustible UO₂ irradié, il a pour conséquences :

- L'accroissement d'un facteur 8 de l'activité résiduelle du plutonium et des actinides mineurs.
- L'accroissement d'un facteur 9 de la toxicité globale du plutonium et des actinides mineurs.
- Un débit de neutrons multiplié par 10.
- Un pouvoir calorifique de 2 à 7 fois plus élevé.
- 2 000 tonnes de combustible MOX irradié à gérer par les « générations futures » en fin 2011.

Et si un réacteur EPR était chargé à 100 % de combustible MOX ?

Le réacteur EPR de 1 600 MW de puissance électrique est-il plus sûr que les REP de 900 MW actuellement en fonctionnement, chargés en combustibles UO₂ ?

Cela se discute...

Mais, s'il était chargé à 100 % de MOX, il serait potentiellement 26 fois plus dangereux dans le cas d'un accident majeur :

Radiotoxicité x 9	Puissance x 1,8	Taux de combustion ⁴ x 1,6
----------------------	--------------------	--

2 - Les premiers assemblages MOX ont été chargés en 1987 à St Laurent B. La teneur en plutonium est allée croissante avec une moyenne de 5,9 % de 1987 à 2010. La teneur actuelle est de 7,08 % pour un chargement annuel par 1/3 de cœur et 8,65 % par 1/4 de cœur.

3 - Il s'agit bien du plutonium contenu dans les seuls combustibles MOX. Cette évaluation est un peu imprécise, car la teneur des combustibles MOX a évolué dans le temps depuis 1987. Fin 2011, il y avait aussi dans les piscines de La Hague 9 459 t d'UOx et 250 t d'URE. En calculant grossièrement la charge pour une teneur de 1 % de Pu résiduel il faut ajouter de au contenu des MOX de l'ordre de 97 t de Pu. Le tonnage de combustibles usés entreposé à La Hague augmente chaque année (9 421 t en 2009, 9 539 t en 2010, 9 709 t en 2011, 9 790 t en 2012) du fait que La Hague retire un tonnage inférieur au tonnage annuel déchargé des réacteurs EDF

4 - 40 GWj/t pour un 900 MW et 65 GWj/t pour un EPR.

L'approche allemande : abandon du retraitement et entreposage – stockage a sec dans des conteneurs

Klaus Janberg - Ancien président directeur général de la GNS (compagnie allemande de service nucléaire : gestion et traitement des déchets). Cette présentation est basée sur des extraits d'autres présentations de l'auteur débutant en 1978, sauf les images concernant le cycle du combustible, qui sont extraites de conférences communes avec Perschmann (GKN), à Nice en 1978 et Moscou en 2002.

Une carrière prometteuse dans le déploiement nucléaire

Ma vie fut « nucléaire » dès la fin de mes études d'ingénieur en RFA (Munich) en 1965, grâce à une bourse du CEA¹, en vue d'un DEA à l'INSTN² et d'un autre à Paris (Faculté des sciences) en 1966, suivis d'un diplôme de l'IAE³ (1967), d'une thèse à la Fac de Paris (1969) et d'un stage à Cadarache sur un problème de Phénix, en 1969.

La suite passait par les « rapides »⁴ chez General Electric, RWE⁵, NERSA (Superphénix). En 1974, André Giraud, administrateur général du CEA, annonçait que Superphénix (1 200 MWe) serait en service en 1982 et que deux autres surgénérateurs seraient lancés avant la fin des années 1980. J'étais euphorique : j'avais choisi la voie de l'avenir...

Mais, déjà en 1976, j'ai dû quitter Superphénix car le gouvernement allemand avait fait passer une loi faisant du retraitement la seule voie du cycle du combustible, sauf si elle était économiquement inacceptable.

Mais à ce moment-là, en Allemagne, la licence d'exploitation de plusieurs réacteurs en phase finale de mise en service dépendait de la possibilité pour les « électriciens » exploitants de présenter des contrats de retraitement des combustibles irradiés, tandis que les entreprises chimiques voulaient se retirer de cette activité qu'ils considéraient comme non rentable.

Les « électriciens » étaient ainsi contraints de créer une filiale commune, la DWK, chargée de négocier avec COGEMA⁶ les fameux contrats UP³⁷ (« cost » plus 25 %), de développer des sites d'entreposage centraux ainsi que de mettre en projet une usine de retraitement (d'une capacité de 1 500 tonnes de combustibles par an) à Gorleben, un site au-dessus d'une mine de sel vierge que le gouvernement voulait développer pour le stockage final des déchets radioactifs.

Jusque-là, j'étais donc en parfaite harmonie avec la politique allemande car les « rapides »⁸ et le « retraitement » sont complémentaires et se conditionnent l'un à l'autre. J'avais seulement négligé deux petits problèmes : les coûts et une résistance croissante contre le nucléaire en RFA.

Chez DWK, vu mon passé, je fus vite chargé de négocier avec mon directeur les contrats UP³ et vous pourriez trouver mon paraphe sur la plupart des premiers contrats signés.

En 1977 j'ai prôché l'utilité du retraitement aux représentants du site de Gorleben en leur faisant visiter La Hague. S'ajoutait à ces activités la conception d'une piscine d'une capacité de 1 500 tonnes de combustibles irradiés à Ahaus et d'une de 3 000 tonnes à Gorleben, comme piscine d'entrée du futur retraitement, ainsi que le développement de châteaux de transport appropriés et rapidement disponibles.

1 - CEA : Commissariat à l'énergie atomique (France).

2 - INSTN : Institut national des sciences et techniques nucléaires, dépendant du CEA (Saclay).

3 - IAE : institut d'administration des entreprises. Ici l'établissement de l'université de Paris 1.

4 - Réacteurs à neutrons rapides ou surgénérateurs (en France Phénix, puis Superphénix).

5 - RWE : compagnie d'électricité allemande.

6 - Cogema : filiale du CEA chargée des industries du combustible nucléaire, dont le retraitement des combustibles irradiés (devenue AREVA NC).

7 - UP³ : usine de retraitement à La Hague spécialement consacrée au retraitement des combustibles irradiés étrangers.

8 - « Rapides » : réacteurs à « neutrons rapides », autre dénomination des « surgénérateurs. »

Piscines et stockages

Les piscines d'entreposage des combustibles irradiés

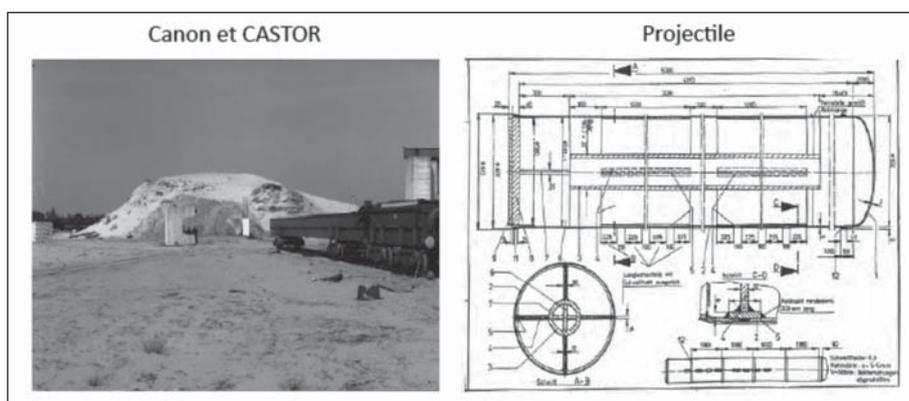
À cette époque, en RFA, il fallait déjà tenir compte d'une chute éventuelle d'un avion militaire, de l'explosion d'un nuage de gaz et prévoir des agressions externes, entre autres avec des charges creuses.

Résultat : les piscines devenaient trop chères et déjà en 1979, l'on a décidé de passer du stockage en piscine au stockage à sec dans des châteaux « les castors » produits en série à l'aide du procédé de coulée avec de la FGS (Fonte à graphite sphéroïdal⁹).

Pour certains essais à l'échelle 1, on avait déjà invité l'IPSN¹⁰ de l'époque, surtout pour les essais de sabotage.

Entre-temps, en 1979, Gorleben comme site du retraitement fut refusé par le gouvernement du « Land¹¹ ».

Figure 1



Une structure « antichute » en béton, même fortement armée, doit être très épaisse, comme le montre le diagramme de la GRS (l'équivalent en RFA de l'IRSN français) de 1973 : en bas du diagramme une épaisseur protégeant contre la pénétration et, en haut, une protection totale (sans éclats à l'intérieur).

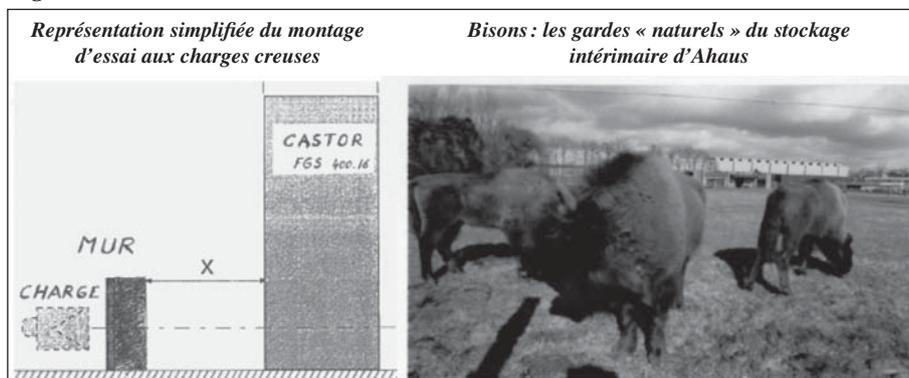
Se protéger contre les sabotages

En 1980, on faisait des essais de « sabotage avec des charges creuses » en simulant entre autres le mur du hall d'entreposage qui servait de défocalisateur du tir pour éviter toute perforation d'un château à l'intérieur (en 1982, j'y ai invité l'IPSN).

À droite de la figure 2, la vue de Ahaus avec des « gardiens spéciaux ».

En décembre 2012, j'ai visité le site de nouveau et je fus consterné d'apprendre que les autorités venaient de réclamer qu'un mur supplémentaire de 10 mètres de haut autour du bâtiment soit construit et que l'installation soit constamment surveillée par des rondes de gardiens armés, en voitures blindées. Ils exagèrent ces Allemands (à mon humble avis!).

Figure 2



9 - Les fontes à graphite sphéroïdal (Fontes GS) sont des fontes spéciales dans lesquelles la cristallisation du carbone a été ralentie pour obtenir des caractéristiques mécaniques de résistance qui en font un matériau proche de l'acier et facile à usiner.

10 - IPSN : Institut de protection et de sûreté nucléaire, alors dépendant du CEA. Aujourd'hui IRSN.

11 - Land de Basse-Saxe.

Vers le stockage direct

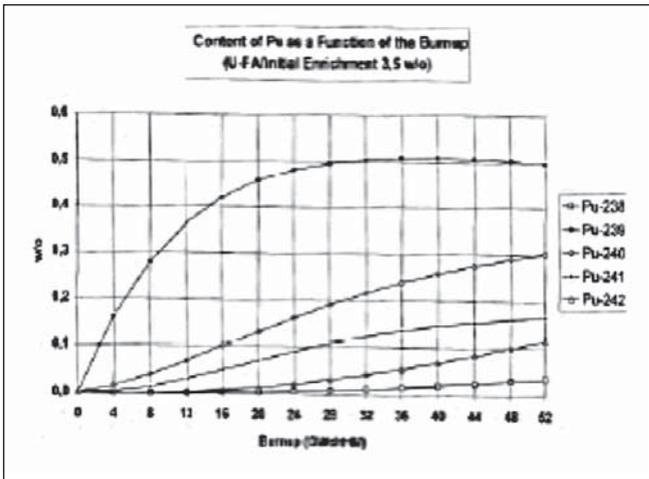
Mais 1980 a été aussi l'année où le gouvernement a demandé une étude de faisabilité d'une « deuxième voie », le stockage direct.

Ainsi naissait la variante POLLUX qui fut acceptée en 1985, sans pour autant que soit levée la priorité au retraitement, car entre-temps, la DWK avait trouvé un site en Bavière, Wackersdorf (1982).

En 1983, COGEMA donnait son prix du retraitement du combustible de Superphénix à NERSA, ce qui amenait celle-ci à renoncer au retraitement et à bâtir une grande piscine jouxtant Superphénix.

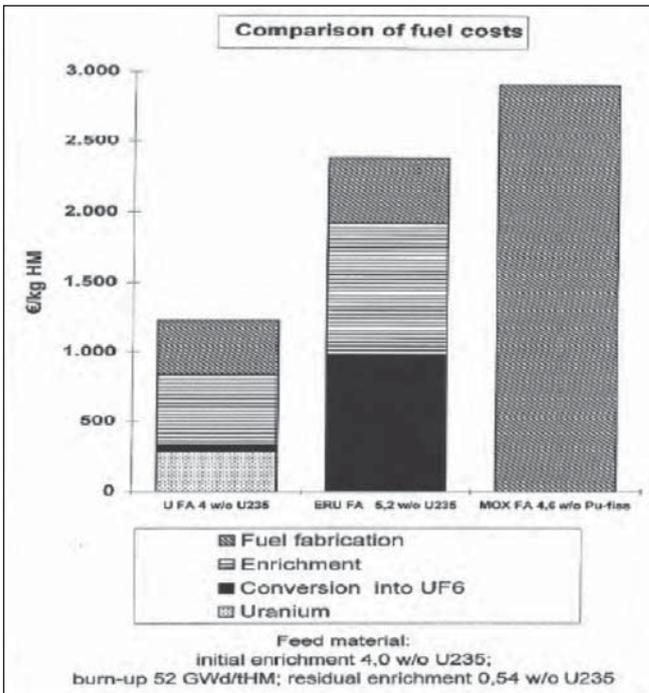
Pour moi, cela sonnait le glas du réacteur à neutrons rapides pour au moins ma génération et mettait en question le retraitement tout court, d'autant plus que le coût de fabrication des assemblages MOX devenait prohibitif et que quelques vérités physiques apparaissaient avec l'augmentation des durées d'utilisation des combustibles¹² (« burn-up »), qui augmentaient les coûts.

Figure 3



Dans un PWR le Pu₂₃₉ atteint une valeur limite vers 40 GWj/tML, tandis que les isotopes absorbants de neutrons, 238, 240 augmentent continuellement. Côté U²³⁵: il descend sous 0,3 % mais le U²³⁶, émetteur gamma, augmente et rend l'enrichissement et la fabrication plus coûteux - une pénalité importante.

Figure 4- Le surcoût du recyclage de l'uranium retraité et du MOX



Ce tableau montre le prix d'un assemblage à base d'Uranium à 10 \$/lb (autour de 2002) et enrichi à 4 %, ensuite le « même » assemblage avec de l'Uranium issu du retraitement à 0,00 \$/lb et à droite un autre fabriqué avec du Pu gratuit. On voit bien les influences de la conversion, de l'enrichissement et surtout de la fabrication.

Mais il faut retenir aussi que le prix de l'Uranium est particulièrement bas ici.

12 - Exprimés en MWj/t : megawattjour par tonne de combustible.

Les années 80, Tchernobyl – La fin du retraitement en Allemagne, grâce à COGEMA

La catastrophe de Tchernobyl en 1986 renforçait l'opposition contre le nucléaire tout court et les Socio-Démocrates qui, au gouvernement en 1976, avaient imposé le retraitement par une loi, se dressaient maintenant contre. Et les coûts de Wackersdorf augmentaient d'un facteur deux en trois ans et les délais s'allongeaient...

Il faut se rappeler que COGEMA, BNFL et DKW formaient un cartel, URG, autorisé par Bruxelles, dans lequel il était convenu qu'après la France et la Grande-Bretagne, la RFA aurait la troisième usine de retraitement.

Surprise majeure : en avril 1989, les « petits » actionnaires de DWK apprenaient que la COGEMA avait signé derrière leur dos une « lettre d'intention » avec le leader de DWK dans laquelle elle lui donnait le droit de vendre 50 % de sa capacité au-delà des 7000 tonnes de base, à 1 500 DM¹³/kg, alors que le prix antérieur était de 2 300 DM/kg. Cela créa un scandale et les « petits » obtinrent des prix encore plus attractifs de BNFL, que COGEMA devait accepter.

Il était évident que dans ces circonstances, la DWK, avec ses coûts largement supérieurs (chute d'avion, cellules inertées, protection contre le sabotage, rétention du krypton, etc.) était condamnée à mort. Il ne lui restait plus que les entreposages d'Ahaus et Gorleben, la gestion commune des contrats avec COGEMA et BNFL, la participation dans la DBE (similaire à l'ANDRA en France), ainsi qu'une autorisation de construction de la PKA (Installation pilote de conditionnement), en vue de la préparation des assemblages pour le stockage direct.

Tout cela fut transféré à la GNS¹⁴ en 1990.

Des installations de Wackersdorf, il ne reste que le hall d'entrée et le local d'entreposage des châteaux ; on y assemble maintenant des voitures BMW.

Depuis cette époque, les électriciens se sont trouvés face à une opposition de Sociaux-démocrates et de Verts décidés à arrêter le nucléaire et cela était discuté ouvertement. Mais ce qui est incompréhensible est que, quand cela a fini par arriver, ils n'étaient pas préparés pour ce qui suivait : la loi pour l'utilisation prioritaire de l'électricité renouvelable¹⁵, qui met en danger la structure même des grandes entreprises d'électricité.

Vers la sortie du nucléaire

• 1998 :

Les Socialistes et les Verts gagnent les élections fédérales.

• 2001 :

Les transports des combustibles usés pour retraitement sont interdits au-delà des contrats en vigueur et portant jusqu'à 2005.

Le combustible usé doit être entreposé à sec dans des châteaux sur les sites mêmes des centrales.

La durée d'exploitation des réacteurs est limitée par une allocation de kWh à produire.

• 2009 :

Le nouveau gouvernement (Chrétiens-démocrates et Libéraux) change la donne : en 2010, les réacteurs sont ré-expertisés et leur niveau de sûreté approuvé. La limite d'exploitation varie entre 8 et 14 ans selon l'âge des réacteurs.

• 11 mars 2011 : Fukushima

Un énorme séisme, bien au-delà du dimensionnement des réacteurs japonais provoque leur arrêt, certains subissant des dégâts importants. Situation grave mais pas catastrophique.

Le tsunami suivant dépasse en hauteur le dimensionnement de la centrale de Fukushima Daiichi (qui normalement aurait dû être correctement dimensionné car des tsunamis similaires s'étaient déjà produits au cours des derniers siècles).

Le rapport Funabashi¹⁶ montre clairement les responsabilités de l'opérateur TEPCO et la légèreté des autorités.

En RFA, cet événement a conduit à une perte presque totale de crédibilité des opérateurs nucléaires et le gouvernement a été contraint de réviser son attitude positive vis-à-vis du nucléaire (surtout avec des élections régionales proches).

13 - DM : Deutsche Mark.

14 - GNS : société allemande de service nucléaire pour la gestion des déchets.

15 - Obligation et tarif d'achat du kWh d'origine renouvelable.

16 - Rapport publié en février 2012, élaboré par la Commission d'enquête indépendante sur l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi, un comité de la Fondation Initiative reconstruire le Japon, dirigé par Yoichi Funabashi, ancien rédacteur en chef du quotidien Asahi Shimbun.

- **2011 : Sortie accélérée du nucléaire**¹⁷

Huit réacteurs arrêtés immédiatement (mars 2011), les autres entre 2016 et 2022. Est-ce que la RFA va réussir à remplacer le nucléaire en si peu de temps par des énergies « nouvelles et vertes » ?

Elle n'a plus le choix, donc elle va réussir. Mais à quel coût ?

Les problèmes à résoudre (de préférence avant-hier) :

- installer suffisamment de moyens de production à bas coût ;
- « lisser » la production alternative de l'électricité sans à coups par des moyens de stockage de l'électricité ;
- créer des lignes nouvelles de transport de l'électricité (courant continu, etc.).

Un exemple de la précipitation combinée à l'obligation d'achat de l'électricité alternative subventionnée (tarif d'achat) : un producteur de taille moyenne a reçu 200 € par MWh le jour de Noël pour « brûler » de l'électricité au lieu du gaz prévu... Un beau cadeau de Noël !

- **Mars 2013 :**

- RWE, le deuxième électricien en RFA, vient de gagner la première étape dans sa plainte contre « l'expropriation » des réacteurs de Biblis A et B, avec un dédommagement de 500 millions d'euros. Et ce n'est pas fini.
- Vattenfall, un électricien suédois ayant plusieurs participations dans les réacteurs en RFA a porté sa plainte devant la « International Court for Settlement of Investment Disputes, Washington, D.C. » qui fait partie de la Banque Mondiale, dirigée par un américain d'origine coréenne qui sera lui-même président de la commission chargée d'examiner ce litige.

Cela va-t-il changer quelque chose dans la décision politique de sortie du nucléaire ?

Je ne pense pas, car les électriciens nucléaires ont déjà abandonné tout projet nucléaire international et sont en train de licencier leur personnel qualifié.

¹⁷ - Voir sur ce sujet les numéros 30 et 33 des « Cahiers de Global Chance ».

Les défis non relevés de la stratégie française du Plutonium

Mycle Schneider - Consultant international en énergie et politique nucléaire
(Mycle Schneider Consulting), basé à Paris

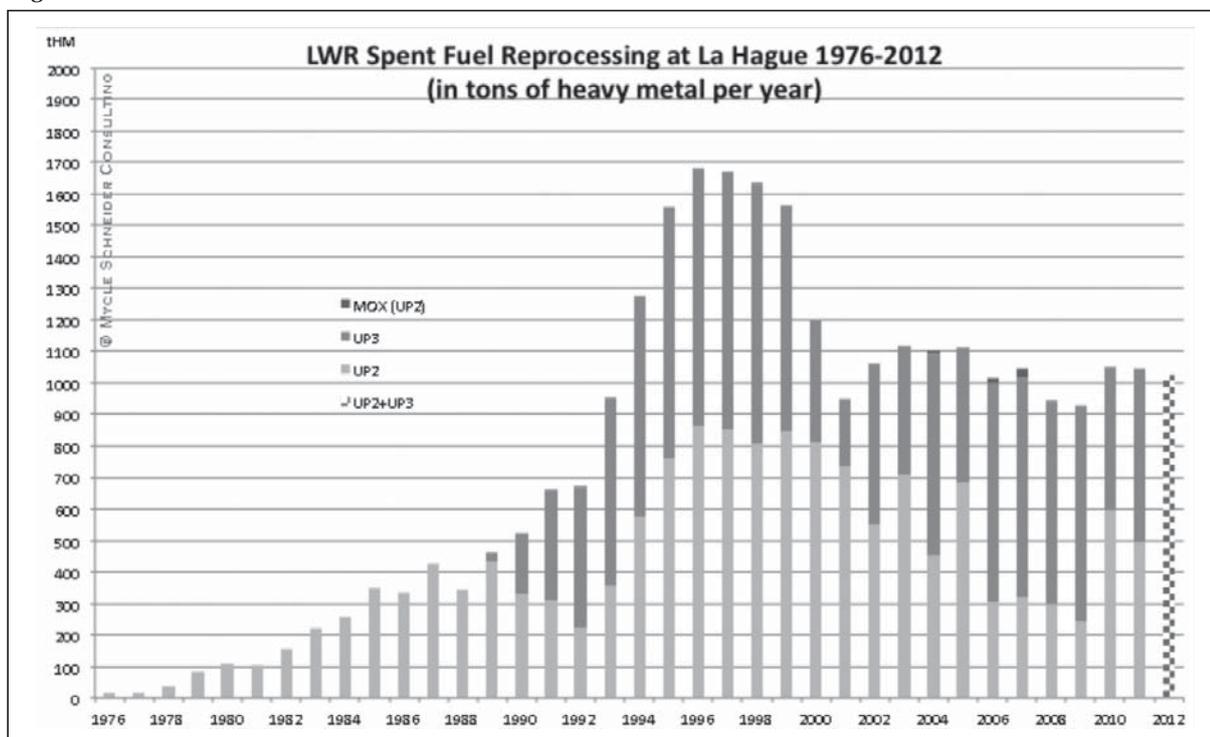
Le retraitement des combustibles irradiés des réacteurs à eau à La Hague

Évolution des quantités retraitées sur la période 1976-2012

On distingue jusqu'en 2011 les activités de l'usine UP2, consacrée essentiellement aux combustibles irradiés des réacteurs des centrales EDF et celles de l'usine UP3 consacrée au début surtout au retraitement des combustibles étrangers. Pour l'année 2012, AREVA n'a pas publié de données séparées des deux usines.

Le retraitement de combustibles MOX ne porte que sur de très faibles quantités et seulement pour les années 2004, 2006 et 2007.

Figure 1



Les combustibles irradiés stockés à La Hague

La quantité de combustibles irradiés stockés à La Hague était de 9 790 tonnes au 31 décembre 2012.

L'usine de La Hague a retraité par le passé des combustibles irradiés en provenance de centrales nucléaires de différents pays. Actuellement cette source est pratiquement tarie et le tableau suivant montre que la part étrangère de combustibles irradiés stockés à La Hague en attente de retraitement est négligeable.

Tableau 1 - Combustibles présents sur le site de la Hague au 31/12/2012

	Part des pays en%
France	100
Australie	<0,1
Belgique	<0,1
Italie	<0,1
Pays-bas	<0,1
Suisse	<0,1
Total	100

Source : AREVA NC, 2013

Les quantités d'uranium et de plutonium issus du retraitement et stockées à La Hague

Les quantités totales stockées étaient au 31 décembre 2012 de 313 tonnes d'uranium (dit « uranium de retraitement ») et 56 tonnes de plutonium (dit « plutonium séparé »).

Le tableau suivant indique la part de ces matières selon les pays d'origine des combustibles irradiés retraités.

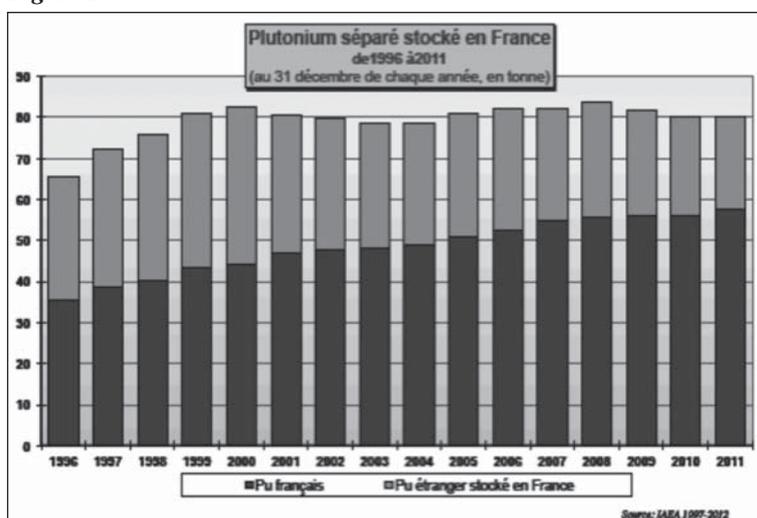
Tableau 2 - Matières radioactives présentes sur le site de la Hague au 31/12/2013

	Part par pays%	Part par pays%
	Uranium	Plutonium
France	93,7	67,5
Allemagne	<0,1	1,8
Australie	<0,1	<0,1
Belgique	<0,1	<0,1
Italie	0	2,1
Japon	0	28,2
Pays-bas	6,3	0,4

Source : AREVA NC, 2013

Le plutonium séparé stocké en France

Figure 2



Alors que la quantité totale de plutonium stocké en France s'est stabilisée autour de 80 tonnes depuis 1999, la part française n'a cessé de croître pour atteindre 57.5 tonnes en 2011.

Orientations industrielles et politiques

Orientation industrielle pré-électorale¹ : période 2010-2012

La fin du retraitement de combustibles irradiés étrangers a conduit à l'augmentation du tonnage traité de combustibles issus des centrales françaises et, de 800 tonnes par an, on passe à environ 1 050 tonnes retraitées (sur 1 200 tonnes déchargées par an).

AREVA espérait y ajouter 450 tonnes par an de nouveaux combustibles étrangers en 2015. Des discussions auraient eu lieu avec la Belgique, l'Allemagne, l'Italie et l'Afrique du Sud. À deux ans de l'échéance, il n'y a pas le moindre signe de progrès vers de nouveaux accords. Au contraire, la probabilité de rapporter de nouveaux contrats se rapproche de zéro.

En ce qui concerne les produits « réutilisables » du retraitement :

- Pour l'uranium de retraitement, on passerait du ré-enrichissement de 300 tonnes à 600–1 000 tonnes par an. 50 à 80 tonnes par an de combustibles à base d'uranium retraité (72 tonnes en 2010) sont utilisées dans les 4 tranches de la centrale de Cruas. Le problème est que les opérations de conversion et d'enrichissement en Russie ont été arrêtées en 2012, sans aucune solution de remplacement. De fait, il n'y a donc actuellement plus de filière de réutilisation de l'uranium retraité en France.
- Pour le plutonium, on passerait d'une production d'environ 100 tonnes par an de combustible MOX (112 tonnes en 2010) à environ 120 tonnes par an utilisées dans 24 réacteurs au maximum.

Les engagements politiques pré-électoraux

L'accord EELV – Parti Socialiste :

« Une reconversion à emploi constant de la filière du retraitement et de fabrication du MOX, et des moyens de stockage des différents types de déchets, notamment le laboratoire de Bure, en centres d'excellence du traitement des déchets et du démantèlement... ».

Les engagements du candidat François Hollande :

- Fermeture des deux réacteurs de Fessenheim.
- Réduction de la part du nucléaire dans la production d'électricité de 75 % à 50 % à l'horizon 2025.

L'accord EELV - PS ajusté... après couac médiatique

Communiqué de Michel Sapin, PS (aujourd'hui ministre du travail) et Jean-Vincent Placé, EELV (sénateur) du 17 novembre 2011, annexé à l'accord EELV-PS :

« Il est prévu dans l'accord que la part du nucléaire dans la production d'électricité en France passera à l'horizon 2025 de 75 % à 50 %. En conséquence et concomitamment avec cette diminution, la quantité de combustible nécessaire à l'approvisionnement des centrales en activité sur notre territoire, ainsi que les **besoins de retraitement** de ces combustibles se poursuivront mais **diminueront**.

C'est pourquoi il est prévu d'accompagner cette évolution progressive d'un plan de reconversion permettant de maintenir le nombre d'emplois, par la mise en œuvre de centres d'excellence du traitement des déchets et du démantèlement ».

Les décisions du gouvernement Hollande

a) Discours du Président François Hollande à la conférence de l'environnement du 14 septembre 2012 :

« J'ai fixé là encore le cap : la part du nucléaire dans la production d'électricité sera ramenée de 75 % à 50 % à l'horizon 2025... ». Et, « La centrale de Fessenheim, qui est la plus ancienne de notre parc, sera fermée à la fin de l'année 2016 ».

b) Ces décisions sont confirmées en Conseil de politique nucléaire du 28 septembre 2012, qui a pris également position sur l'industrie du plutonium :

« La stratégie de retraitement des combustibles usés et le emploi dans les réacteurs français des matières fissiles extraites, sous la forme de combustible MOX, sont confirmés ».

1 - Élection présidentielle d'avril 2012. François Hollande élu Président de la République.

Analyse de la stratégie industrielle

Figure 3 - Les « pour » et les « contre » de la stratégie retraitement - MOX en France

Pour	Contre
Continuité	Economie
Economie locale	Risques (piscines, liquides, transports)
Emploi local à court terme	Réduction de la part du nucléaire
	Stocks de Pu et d'Uranium retraité - valeur comptable nulle - valeur marchande négative
	Prolifération (mauvais exemple, transports)
	Complexité du système (gestion du cœur, logistique)
	Production de Mox irradié

Les champions nucléaires français en difficulté économique²

- **EDF:**
 - La valeur en bourse a plongé jusqu'à 85 % depuis 2008.
 - Dette importante: 39,2 milliards € (29,2 milliards € en 2011)
- **AREVA:**
 - Perte de 100 millions € en 2012 (2,5 milliards € en 2011)
 - Dette importante de 3,95 milliards € (3,45 milliards € en 2011).
 - La valeur en bourse a plongé jusqu'à 88 % depuis 2008.
 - Appréciation de Standard & Poor's du 20 décembre 2011 :
 - Baisse de la note globale à BBB (soit à un cran seulement au-dessus de « spéculatif » - « junk »)
 - Baisse de « Stand Alone Credit Profile » (SACP) à la note BB (à un cran au-dessus de « très spéculatif »).

La conséquence de ces difficultés est une forte incitation à réduire les coûts.

Les conséquences de la réduction de la part du nucléaire dans la production d'électricité

a) Scénario de l'ANDRA (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs)³

- Les 22 réacteurs « MOXés » appartiennent tous à la série des réacteurs REP de 900 MW de puissance électrique.
- Ces réacteurs atteindront une durée de fonctionnement de 40 ans (après la première divergence) durant la période 2017 – 2022.
- Si la production de plutonium par le retraitement doit s'ajuster à la consommation de MOX, alors cela signifie un arrêt de la production de plutonium et donc un arrêt du retraitement à La Hague autour de 2018-2019.

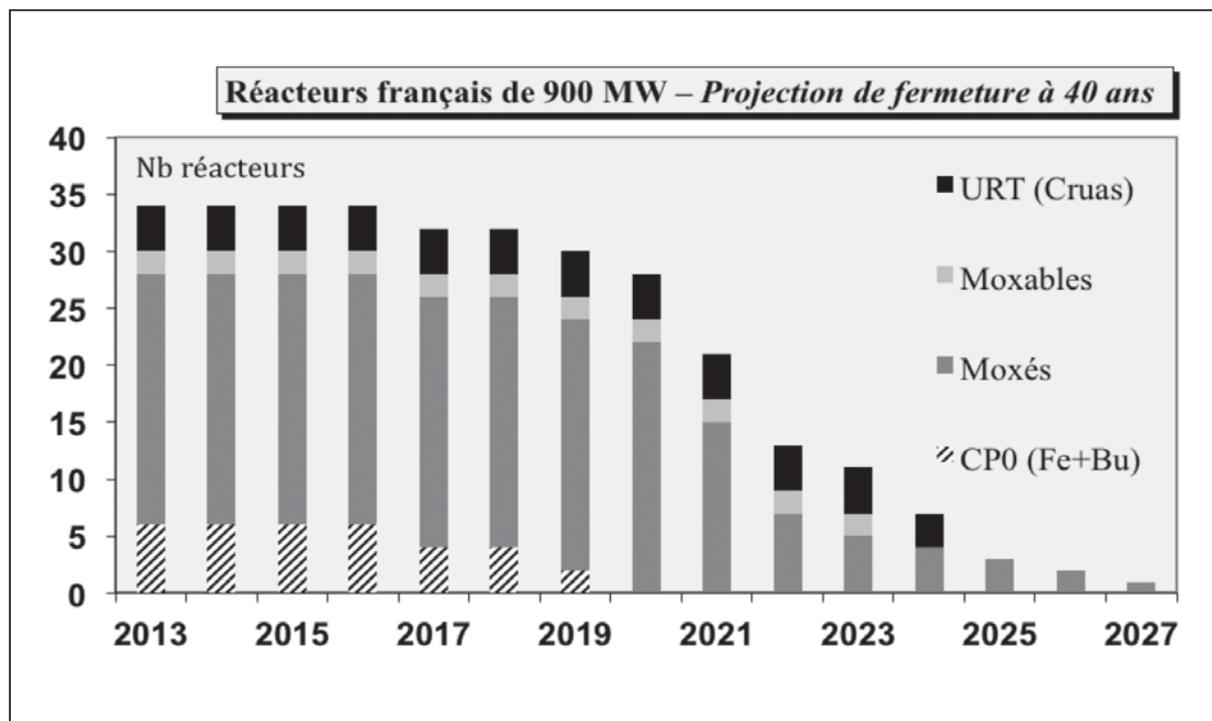
b) Scénario de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie)⁴

- « La puissance installée nucléaire de 32 GW en 2030 est compatible avec un point de passage à 50 % de la production électrique en 2025 », objectif du Président Hollande. On rappelle que la capacité totale du parc nucléaire d'EDF est de 64 GW (58 réacteurs en fonctionnement + un EPR en construction à Flamanville). Et que la capacité des 34 tranches de 900 MW est de 29 GW.

2 - Sources : Sites des sociétés ; Standard & Poor's, 20 décembre 2011.

3 - Source : ANDRA, « Rapport de synthèse – Inventaire National des matières et déchets radioactifs », juin 2012.

4 - Source : ADEME, « Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050 », 8 novembre 2012.



Note : URT = uranium de retraitement.

Dans ce scénario il n'y a donc plus d'utilisation possible du plutonium à partir de 2027 dans le parc français.

Les options alternatives de gestion des combustibles irradiés et du plutonium

Objectifs de sûreté

a) Sur les combustibles irradiés

Actuellement, les combustibles irradiés UO_2 ou MOX sont stockés de façon transitoire (quelques années) dans les piscines jouxtant les réacteurs, puis dans la piscine de La Hague, en attente (pour les UO_2) du retraitement. On a vu que tous les combustibles UO_2 ne sont pas retraités : il y a donc accumulation.

Les piscines des réacteurs comme de La Hague ne sont pas protégées contre des agressions extérieures d'une part, ni contre une perte totale de refroidissement : ce sont donc des installations à haut risque. Afin de réduire le potentiel de danger, il conviendrait de réduire la quantité de combustible en le transférant en stockage à sec, autant que possible, aussi rapidement que possible.

b) Sur le plutonium

Les quantités en excès de plutonium, actuellement en dépôt à La Hague et à Marcoule, devraient être « immobilisées » (voir ci-dessous) et stockées dans des installations bunkerisées et protégées.

Une option technique alternative pour les combustibles irradiés

- Ne pas les retraiter.
- Les entreposer sur une longue durée dans un stockage à sec « bunkerisé » ou en sub-surface (avec réversibilité et récupérabilité).

Les options techniques alternatives pour le plutonium non irradié

- L'immobilisation avec des déchets radioactifs dans des verres ou des céramiques (voir la présentation de Frank von Hippel).
- L'immobilisation dans du « mauvais MOX », tel qu'il existe déjà soit sous forme de rebuts de fabrication des combustibles MOX, soit par le combustible neuf et non utilisé, ni retraité, de Superphénix. De tels assemblages « de stockage de plutonium » pourraient ensuite être mis dans des conteneurs de stockage de combustibles irradiés afin de créer une barrière radiologique de protection.

Conclusions

- La stratégie passée a conduit à une impasse :
 - Les stocks de combustibles irradiés UO₂ et MOX, de plutonium, d'uranium retraité et d'uranium appauvri (issu de l'enrichissement de l'uranium) augmentent.
 - Les risques augmentent.
 - Il n'existe aucune solution, même à moyen terme, sauf à recourir à des moyens encore inexistants comme les nouveaux réacteurs dits de Génération IV⁵.
- Les décisions politiques du Président Hollande conduisent à la réduction de la part du nucléaire qui elle-même élimine les éléments centraux de l'ancienne stratégie, les réacteurs MOXés, et par conséquent confirment l'urgence de bâtir une nouvelle stratégie cohérente.
- La reconversion de la filière au plutonium par « la mise en œuvre de centres d'excellence du traitement des déchets et du démantèlement » servirait la sûreté, la sécurité et la non-prolifération

5 - La proposition actuelle en France pour ces « nouveaux réacteurs » étant le surgénérateur au plutonium, refroidi au sodium, filière du type Superphénix, qui a échoué dans le passé dans tous les pays qui l'ont mis en exploitation.

Le projet CIGEO d'enfouissement des déchets nucléaires

Ce projet d'enfouissement, actuellement soumis à un débat public, est l'objet de nombreuses polémiques, depuis son origine, au point que les réunions publiques qui devaient se tenir au titre de ce débat public n'ont pas pu être tenues. Un certain nombre d'experts, dont plusieurs de Global Chance, tout en déplorant vivement que les pouvoirs publics n'aient pas été en mesure de créer les conditions indispensables à la tenue de ce débat (en particulier l'attente de la fin du débat national sur la transition énergétique pour engager ce débat et la prise en compte des enseignements du débat organisé par la Commission nationale du débat public en 2005¹), ont cependant accepté de participer à des débats filmés en direct sur Internet, afin d'apporter des éléments d'appréciation à l'ensemble de nos concitoyens. Mais cette information ne peut en aucun cas se substituer au débat public dont il reste indispensable pour les pouvoirs publics de créer les conditions.

L'enfouissement géologique des déchets nucléaires de haute activité en France : quels types de déchets, quelles quantités ?

Jean Claude Zerbib, André Guillemette

Sommaire

1 - La transmutation et ses contraintes

1.1 Les limites de la transmutation

2 - Combustibles usés et matières nucléaires produits

2.1 Combustibles usés et matières nucléaires produits

2.2 Flux annuels de combustibles nucléaires

2.3 Volumes de déchets du retraitement accumulés fin 2010

3 - Périmètre des déchets et combustibles nucléaires dédiés à l'enfouissement profond

3.1 Les déchets prévus dans CIGEO, version ANDRA

3.2 Les déchets prévus dans CIGEO, version HCTISN

3.3 Le cycle du combustible jusqu'en 2017, version officielle présentée par les exploitants EDF, AREVA et ANDRA à l'ASN

3.4 La position du gouvernement en matière de politique électronucléaire

4 - Choix de la présente étude

4.1 Données thermiques après trois ans de refroidissement

4.2 Données thermiques, jusqu'à 300 ans de refroidissement

5 - Synthèse de données sur les colis matières EDF devant être stockés en site profond dans le projet CIGEO

5.1 Bilan matières fin 2010- 2012

5.2 Bilan matières prospectif

5.3 Répercussions sur le cycle du combustible consécutives aux arrêts de réacteurs

5.4 Calculs des tonnages de combustibles et des volumes de déchets

5.4.1 Bilan du cycle en 2030

5.4.2 Le bilan de l'ANDRA pour une durée d'exploitation des réacteurs de 40 ans

5.4.3 Bilan à 50 ans selon l'ANDRA

6- Conclusions

7- Bibliographie

Annexe 1 : Focus sur la production française d'électricité d'origine nucléaire

Annexe 2 : Classement des réacteurs PWR de 900 MWe

Annexe 3 : Tonnages de combustibles retraités dans les usines de La Hague

Résumé

Plusieurs stratégies ont été envisagées pour gérer les déchets de haute activité produits par le fonctionnement des réacteurs nucléaires producteurs d'électricité. Elles concernent soit les combustibles usés laissés en l'état, soit les produits résultant du retraitement (produits de fission, actinides mineurs et déchets de structure).

La première solution consiste en un stockage définitif en surface (ou entreposage à sec dans l'attente d'une autre solution) des différents « colis¹ », dans des installations dont l'espérance de vie varie de 50 à 100 ans. Le choix d'un tel stockage suppose la pérennité des institutions chargées de la gestion de ces déchets durant des millénaires. Il permet également d'attendre la mise au point d'une nouvelle technique de gestion après un long refroidissement des combustibles « usés ».

La seconde solution consiste, après une période de refroidissement de 60 à 90 ans, en l'abandon des déchets dans une formation géologique profonde, peu perméable à l'eau, afin d'assurer la protection à long terme des colis contre la dégradation par des eaux souterraines. La pollution des eaux qui en résulterait deviendrait en effet très dangereuse pour les êtres vivants.

Dès la première loi « Bataille² » de 1991 sur la gestion de déchets, une 3^e solution consistant en une séparation-transmutation des radionucléides à vie longue avait été envisagée. Cette voie de recherche, qui a également été retenue dans la loi de 2006, n'a de sens qu'en accompagnement du recyclage du plutonium qui constitue, au bout de quelques siècles, la première nuisance potentielle du combustible UOX.

Les travaux effectués sur la transmutation montrent que cette voie est inopérante pour les produits de fission de longues périodes. S'agissant des actinides mineurs principaux (américium et curium), la séparation est possible, mais les faibles rendements de transmutation³ nécessitent plusieurs recyclages, ce qui rend cette option longue et coûteuse. Le développement industriel de cette technique est donc peu probable.

Dans la double hypothèse d'une réduction à 50 % de l'énergie électrique d'origine nucléaire en 2025 et d'une durée d'exploitation des réacteurs fixée à 40 ans, nous observons que la réduction, annoncée par le Président de la République, est obtenue fin 2022 après l'arrêt du 23^e réacteur de 900 MWe. Parmi ces réacteurs, 17 fonctionnent avec des combustibles MOX.

Une fois la réduction réalisée, 11 réacteurs de 900 MWe resteront en fonctionnement, dont 7 avec des chargements de combustibles MOX et 4 avec des combustibles à base d'uranium de retraitement (URT). Comme huit réacteurs, fonctionnant avec du MOX, devraient être arrêtés en 2021, sept autres en 2022 et deux en 2023, les besoins en plutonium et en combustible MOX diminueront alors drastiquement (17 réacteurs utilisant du MOX arrêtés sur 24 en 3 ans), ce qui entraînera une forte réduction du tonnage retraité.

La réduction de la production électrique d'origine nucléaire s'accompagnera d'un impact significatif sur les mailons aval et amont du cycle du combustible car la majorité des réacteurs arrêtés utilisent du combustible MOX (17/23), ce qui entraîne la réduction du tonnage retraité et de la fabrication de ces combustibles.

Nos évaluations ont porté sur les déchets de très haute activité (THA) et moyenne activité à vie longue (MAVL) constitués des produits vitrifiés issus du retraitement des combustibles des réacteurs à eau pressurisée (PWR) d'EDF, des matériaux métalliques compactés (éléments d'assemblages combustibles), conditionnés dans des conteneurs standards de déchets ou des combustibles usés laissés en l'état dans deux scénarios : retraitement limité aux besoins de MOX, retraitement intégral de tous les combustibles.

Le retraitement intégral des combustibles usés conduit à utiliser des surfaces de stockage géologique inférieures à celles nécessaires au retraitement adapté aux seuls besoins de la production de combustible MOX, car le stockage des combustibles usés, particulièrement celui des MOX, est très pénalisant du fait de sa forte dissipation thermique⁴. Cependant, le retraitement intégral produit une quantité de plutonium qui se mesure en centaines de tonnes, une masse considérable que les réacteurs du futur, qui restent à concevoir et à construire, auront peut-être du mal à épuiser. Or aucune étude connue n'envisage de considérer, qu'une fraction plus ou moins grande de ce stock de plutonium, devra être considérée comme un déchet et conditionnée de manière sûre vis-à-vis du risque de toxicité potentielle et de prolifération qu'il présente.

Les évaluations faites dans le cas d'une durée d'exploitation des réacteurs de 40 ou de 50 ans, associée au retraitement intégral, montrent que les tonnages de plutonium obtenus sont supérieurs à 400 tonnes. Nos calculs des tonnages de combustibles usés mis en jeu dans le cas des deux hypothèses de durée de vie des réacteurs sont très proches des estimations publiées par l'ANDRA. En prenant les critères de stockage de l'ANDRA, les surfaces occupées par ces déchets THA, dans un site en profondeur géologique, varient entre 2,7 et 4,5 kilomètres carrés.

1 - Le nom de « colis » a été donné aux conteneurs qui renferment les déchets radioactifs.

2 - La loi du 30 décembre 1991, connue sous le nom de son rapporteur, Christian Bataille, est relative aux recherches à conduire en matière de gestion des déchets de haute et moyenne activité.

3 - Pour un séjour des cibles durant 5 ans en réacteur, la transmutation concerne 30 % de l'américium et 50 % du curium [CEA2012b].

4 - Guillemette A et Zerbib JC, Les combustibles MOX d'EDF, production et stockages, bilans 2011, Global Chance, N° 33, mars 2013.

Pour assurer la gestion à long terme des déchets ultimes de haute activité, la Commission Castaing⁵ avait noté que deux stratégies pouvaient être envisagées :

- La première est fondée sur la *pérennité du contrôle* des déchets. Si elle est acquise, le stockage peut alors se faire en surface et se trouve en situation de reprise permanente possible. Ce n'est plus la stabilité du stockage qui est requise dans ce cas mais celle de l'institution humaine chargée de la surveillance. Mais il est difficile d'assurer un tel système sur des milliers d'années. Ce choix permet également un entreposage sûr dans l'attente de la mise au point d'une autre technique de gestion des déchets.
- La seconde stratégie consiste à *abandonner les déchets* stockés définitivement en profondeur, après une phase opérationnelle et une phase de surveillance. Cette option implique que l'on puisse définir la sûreté et la garantir sur des échelles de temps qui peuvent se compter en millions d'années en s'appuyant sur la tenue à long terme des colis et des diverses barrières technologiques et naturelles.

Les barrières technologiques, qui s'emboîtent comme des poupées russes, sont constituées du déchet conditionné lui-même (verre, bitume, coques compressées⁶ ou l'assemblage combustible), des conteneurs qui l'enferment, des barrières géochimiques ajoutées et de la roche d'accueil. L'objectif de ces barrières est d'éviter le contact du déchet avec l'eau qui finit par attaquer et dissoudre les matières.

Plusieurs familles de roches se présentent : l'argile, le granit et le sel⁷. Le sel avait été exclu du choix par la Commission Castaing, car ce type de roche a déjà été utilisé pour entreposer du combustible liquide. La cavité est en pratique creusée par une injection d'eau (avec récupération de la saumure) et une telle opération serait catastrophique si elle survenait au niveau d'un site de stockage dont on aurait perdu la mémoire.

Le granit a été choisi par la Suède⁸, la Finlande⁹ et le Canada. La Belgique¹⁰ et la France ont choisi l'argile.

1. La transmutation et ses contraintes

Avant de nous concentrer sur la question du stockage des déchets nucléaires, il est intéressant de nous arrêter un instant sur une voie qui avait soulevé des espoirs importants dans les dernières décennies du vingtième siècle, celle de transformer des déchets à vie très longue (plusieurs dizaines de siècles, en déchets à vie inférieure à quelques centaines d'années), la « séparation transmutation » et de réduire ainsi les contraintes temporelles du stockage des déchets.

La séparation-transmutation a été inscrite comme l'un des trois axes de recherche prescrits par la loi du 30 décembre 1991. Afin d'assurer la gestion des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue¹¹ (HA-MAVL), la loi du 28 juin 2006, relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs, a repris ces trois axes : le stockage réversible en couche géologique profonde, l'entreposage, la séparation et la transmutation des isotopes à vie longue.

La transmutation a pour objectif de transformer les radionucléides de période longue que sont les trois actinides mineurs (neptunium, américium, curium) en isotopes à vie courte au moyen d'un bombardement neutronique. Cette option, qui vise à réduire la toxicité des déchets à long terme, ne constitue donc pas, à elle seule, une solution pour tous les déchets produits.

Il découle, de la mise en œuvre de la transmutation, une triple contrainte, car il est nécessaire, après avoir procédé au retraitement des combustibles usés¹² :

5 - Commission Castaing, *Rapport du groupe de travail sur la gestion des combustibles irradiés*, Conseil supérieur de la sûreté nucléaire, décembre 1981-Novembre 1982, 84 pages.

6 - Les tronçons de gaines (coques) sont compressés car si leur fusion aurait permis une plus grande réduction de volume, elle conduisait aussi à un relâchement du tritium fixé.

7 - Les allemands ont stocké depuis 1967, à titre expérimental, des déchets de faible activité (126 000 fûts) et moyenne activité (4 300 fûts) dans l'ancienne mine de sel d'Asse. Des mouvements de terrain ont conduit à des écoulements d'eau et 12 m³ sont extraits journalièrement du site qui a été fermé.

8 - En 2009, la Suède a choisi le site de Forsmark, à 200 km au nord de Stockholm, parmi deux sites candidats pour abriter un stockage en profondeur (500 m) de combustibles « usés ». Depuis 1985, la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB), entrepose plus de 5 000 tonnes de combustibles usés dans des piscines situées sous 50 mètres de roche.

9 - Le site devrait se situer sur l'île d'Olkiluoto, à 230 km au nord-ouest d'Helsinki. Le stockage qui concerne les assemblages de combustibles usés, insérés dans un cylindre de fonte encapsulé dans un fourreau de cuivre, se fera à environ 400 mètres de profondeur. Dès 2004, un laboratoire souterrain avait été construit (sur le site d'Oncalo), en vue de la réalisation du stockage géologique. C'est une entreprise (Posiva), créée par deux exploitants nucléaires, qui a demandé en décembre 2012 à l'État finlandais l'autorisation de construire le site.

10 - Dès 1983, la Belgique a créé un laboratoire creusé sous le Centre nucléaire de Mol.

11 - De manière arbitraire, il a été décidé de qualifier de « longues » les périodes radioactives d'environ 30 ans et plus. Ce choix vise à prendre en compte les principaux produits de fission tels que le strontium 90 ($T = 28,15$ ans) et le césium 137 (30,15 ans).

12 - Le retraitement actuel des combustibles usés sépare en trois familles les éléments radioactifs produits dans les réacteurs : l'uranium, le plutonium et les produits de fissions (PF) mêlés aux actinides mineurs.

- D'extraire des solutions de produits de fission (PF) les actinides mineurs¹³ à vie longue. À l'échelle du laboratoire, la séparation des trois actinides mineurs a été démontrée ainsi que l'extraction du césium et de l'iode (actuellement rejeté en mer) des solutions de produits de fission.
- Confectionner des « cibles » solides¹⁴ qui seront soumises à un flux neutronique.
- Réaliser un réacteur à neutrons rapides qui permettra les transmutations. Les réacteurs de type REP donnent, par capture neutronique, des actinides de rang plus élevé, ce qui ne résout pas le problème. Comme la production d'actinides mineurs est bien plus importante dans les combustibles MOX¹⁵ que dans les combustibles UO₂, l'option transmutation devrait logiquement conduire au retraitement des combustibles MOX.

Pour passer au niveau industriel, la séparation nécessite des opérations technologiquement et financièrement très lourdes. Compte tenu des délais de mise au point au niveau industriel des techniques et des appareillages, la greffe de ces moyens sur les usines de La Hague est exclue, compte tenu de la durée de vie des installations existantes (2030 ?) et des difficultés d'insertion de nouvelles installations de grande taille.

Si l'option « transmutation » était choisie, elle nécessiterait donc la conception d'une nouvelle usine de retraitement du combustible irradié qui ajoutera, à la séparation de l'uranium et du plutonium, l'extraction d'un ou plusieurs actinides mineurs (Np, Am, Cm) des solutions de produits de fission et leur conditionnement, en phase solide, dans des cibles. Ces cibles nécessiteront des expérimentations préalables afin de valider leur tenue à l'irradiation et aux gaz produits en interne (hélium et PF gazeux).

1.1 Les limites de la transmutation

La faisabilité technique de la transmutation des actinides mineurs, émetteurs alpha, en noyaux plus légers de périodes plus courtes, a été démontrée lors d'expériences conduites au CEA dans le réacteur Phénix à Cadarache. Ce n'est cependant pas le cas des produits de fission (PF) à vie longue (césium 135, chlore 36, iode 129, technétium 99) pour lesquels la réalisation de l'extraction et de la transmutation est difficile voire impossible [CEA2012b]. Aussi, depuis 2006, le CEA a arrêté les recherches sur la transmutation des PF. Les travaux ne portent plus que sur les actinides mineurs.

Comme la transmutation des actinides est un processus lent, il faut retraiter les cibles et recycler plusieurs fois les actinides non-transmutés. Si la charge thermique des déchets sera allégée d'une fraction plus ou moins importante des actinides, cela ne signifie pas que l'on pourra se passer du stockage géologique, qui portera sur la fraction non-transmutée, le plutonium et les produits de fission formés.

La transmutation réduit les masses d'actinides mineurs et leur charge thermique, mais laisse un résiduel de plusieurs dizaines de % associé au plutonium et aux produits de fission (PF).

Suivant la cible (neptunium, américium ou curium) il reste, après un séjour de 5 ans dans un réacteur à neutrons rapides, 30 % (cas de l'américium 241 et 243) à 50 % (curium 244) de l'actinide tandis que du plutonium (38 % pour l'²⁴¹Am, 11 % pour le ²⁴⁴Cm) et des produits de fission (24 % pour l'²⁴¹Am, 28 % pour le ²⁴⁴Cm) ont été formés [CEA2012b].

La transmutation des actinides mineurs qui visait à produire des PF, a donc un rendement de 28 % au maximum, après 5 années d'irradiation.

La transmutation est dite homogène lorsque l'actinide est mélangé de manière uniforme au combustible. Mais la présence de cibles d'actinides mineurs dans un réacteur peut poser des problèmes de sûreté, si la teneur est élevée (limitées à 2 ou 3 % environ). Afin de réduire ces difficultés, il est possible de placer les cibles en périphérie du cœur, mais le flux de neutrons est réduit ainsi que les taux de transmutations. Dans ce cas, la transmutation est dite hétérogène. Les actinides sont dans une matrice inerte (oxyde de magnésium).

La transmutation peut aussi être découplée des réacteurs électronucléaires où aux fissions s'ajoutent des réactions de capture neutronique qui produisent d'autres actinides mineurs. Cette option nécessite la réalisation d'un réacteur souscritique sans uranium et d'une source de neutrons (accélérateur de protons de plusieurs centaines de MeV couplé à une cible de spallation) dédiés aux opérations à réaliser. L'arrêt du faisceau éteint la réaction en chaîne.

Ce système hybride ou ADS (Accelerator Driven System) est une idée développée par Carlo Rubbia (Prix Nobel de physique, 1983) dans les années 1990. En 1995 et 1996, une approche expérimentale du procédé a été réalisée

13 - Si une adaptation simple du procédé PUREX permet d'extraire le neptunium, il faut des procédés de séparation sélectifs pour séparer l'américium et le curium, qui sont chimiquement très proches. Comme ce sont les isotopes de l'américium (²⁴¹Am, T = 432,7 ans) qui pèsent le plus sur la thermique et la toxicité à long termes, des procédés chimiques spécifiques ont été étudiés pour extraire, en priorité, cet actinide des solutions de PF (Am seul ou Am + Pu) [CEA2012b].

14 - Dans le cas du recyclage homogène, le neptunium 247 (émetteur α de période = 2,14 millions d'années) est mélangé de manière homogène au matériau combustible (UO₂ + PuO₂). Cette opération nécessite la mise en œuvre de technologies proches de celle des combustibles MOX, qui augmentent les coûts de fabrication.

15 - Pour un même taux de combustion (45GWj/t), le MOX usé renferme une masse d'actinides mineurs 4,9 fois supérieure et une activité 10,8 fois supérieure à celle d'un combustible UO₂ [Guillemette2013].

au CERN, à Genève. Le 6^e programme (2007-15) consiste en un couplage entre un réacteur souscritique (réacteur Vénus du SCK-CEN de Mol en Belgique) sans uranium et une source de neutrons de 14MeV générés par un accélérateur de deutons. Cette installation, terminée début 2010, est expérimentée depuis avril 2012.

2. Combustibles usés et matières nucléaires produits

L'évaluation du volume de déchets produits par le retraitement du combustible, et celle du tonnage des différents types de combustibles usés gardés en l'état, dépendent notamment des hypothèses faites, sur l'échéancier de mise à l'arrêt des réacteurs et sur les prévisions des tonnages à retraiter, décidées par AREVA et EDF. Ces volumes et tonnages s'ajouteront à ceux cumulés à ce jour.

2.1 Combustibles usés et matières nucléaires déjà produits

A partir des données disponibles, nous pouvons décrire les tonnages de combustibles usés retraités et entreposés, les volumes de déchets issus du retraitement (déchets bitumés, produits vitrifiés, coques compactés, etc.), les tonnages de plutonium ouvragé ou non déjà produits, ainsi que les flux annuels des différents substances radioactives de haute et moyenne activité. Le tableau N° 1 suivant dresse un état des lieux, fin 2010. Il y avait à cette date un total 18914 tonnes de combustibles usés ou en charge dans le cœur des réacteurs d'EDF, au CEA et dans la propulsion navale militaire.

Tableau 1 : Combustibles usés et matières issues du retraitement des combustibles irradiés (Tonnes de métal lourd)

Matières	Fin 2010
Combustibles UOX en cours d'utilisation dans les réacteurs EDF	4477
Combustibles MOX en cours d'utilisation dans les réacteurs EDF	299
Combustibles URE en cours d'utilisation dans les réacteurs EDF	156
Total tonnages en cours d'utilisation	4932
Combustibles UOX usés ^{a)} , entreposés en piscine	12006
Combustibles MOX usés ^{b)} , entreposés en piscine	1287
Combustibles URE usés ^{c)} , entreposés en piscine	318
Combustibles usés des réacteurs civils de recherche ^{d)} , entreposés en piscine	53
Combustibles métalliques usés entreposés en piscine	15
Combustibles usés du réacteur à neutrons rapides ^{e)} Superphénix	104
Combustibles usés des réacteurs de recherche ^{f)}	53
Combustibles usés de la propulsion navale	146
Total tonnages combustibles usés^{g)}	13982
Uranium issu de combustibles usés après traitement URT ^{h)}	24100
Plutonium issus des combustibles usés après traitement ⁱ⁾	80
Uranium appauvri ^{j)}	271481

a) Dont 8380 tonnes (69,8 %) entreposées sur le site de La Hague fin 2010 et 3626 t dans les piscines des réacteurs d'EDF. Les tonnages de combustibles usés, fin 2010, proviennent de [Andra 2012], page 49/212.

b) 900 tonnes sont entreposées à La Hague (69,9 %), 387 t dans les piscines des réacteurs EDF (Blayais, Chinon B, Dampierre, Gravelines, St Laurent des Eaux B, Tricastin) et 299 t sont chargées dans les réacteurs fin 2010.

c) Environ 250 tonnes de combustible URE (uranium de recyclage enrichi à 4,1 %) sont entreposées à La Hague et 68 t dans la Centrale EDF de Cruas et 156 t sont chargées dans les réacteurs de Cruas. Ce type de combustible n'a pas encore été retraité à La Hague.

d) 43 tonnes du réacteur Phénix sont entreposées au CEA Cadarache, 2 tonnes à La Hague.

e) Ce combustible est entreposé sur le site de Creys-Malville.

f) A l'état neuf, ces combustibles étaient constitués d'uranium très enrichi (7 à 90 %). Leurs taux de combustion sont très élevés.

g) Sur ce total, 9539 tonnes (69,2 %) sont entreposées sur le site de La Hague fin 2010 (9709 t fin 2011 et 9790 t fin 2012). À l'ensemble des combustibles usés non retraités, il faudrait ajouter ceux des réacteurs de sous-marins nucléaires (146 t) fin 2010.

h) Dont 2070 tonnes appartiennent à des clients étrangers. La fraction du tonnage d'uranium de retraitement, entreposé à La Hague, n'est que de l'ordre de 1 % de la quantité produite (208 t en 2010, 333 t en 2011 et 293 t en 2012). Le reste se trouve sur les sites de Romans, du Tricastin et de Cruas. L'URT se trouve sous forme d'UF6 ou d'U³O₈.

i) 60 tonnes sont entreposées à La Hague fin 2010 (dont 37,7 t appartiennent à la France), 8 t en cours de fabrication de combustible MOX, 10 t dans les MOX neufs et 2 t entreposées dans diverses installations du CEA. Fin 2011 il y avait 57 t entreposées (dont 36,2 t pour la France) et 56 t (dont 37,8 t) fin 2012.

j) Cet uranium est entreposé principalement sur les sites du Tricastin (165900 t) et de Bessines (104600 t).

Sources : [ANDRA2012] chapitre 2.3, [Global Chance 2013], [AREVA2011], [AREVA2012].

* Dont 8380 tonnes (69,8 %) entreposées sur le site de La Hague fin 2010 et 3626 t dans les piscines des réacteurs d'EDF. Les tonnages de combustibles usés, fin 2010, proviennent de [Andra 2012], page 49/212.

2.2 Flux annuels de combustibles nucléaires

Les cœurs des 58 réacteurs nucléaires du parc EDF, qui renferment 4 932 tonnes de combustible, produisent environ **1 200 t/an** (1 162 t/an sur 3 ans de 2010 à 2012), de combustibles irradiés. Selon EDF, ce tonnage de combustibles irradiés regroupe trois types de combustibles [EDF2013], soit environ¹⁶ :

- 1 010 t/an de combustible UOx, enrichi de 3,1 à 4,0 % en 235U à partir d'uranium naturel [CEA2012],
- 70 t/an de combustible produit à partir de l'uranium du retraitement¹⁷ enrichi (URE) à 4,1 %, utilisés dans les 4 réacteurs de 915 MWe de la Centrale de Cruas (18,5 t/an par réacteur),
- 120 t/an de combustible MOX (mélange d'oxyde d'uranium appauvri et d'oxyde de plutonium) fabriqués à partir du plutonium extrait des UOx usés retraités dans les usines de La Hague. Ces combustibles peuvent être utilisés dans 28 des 34 réacteurs¹⁸ de 900 MWe du parc EDF. L'enrichissement moyen en plutonium a varié de 7,08 % à 8,65 %.

Comme les usines de La Hague retraitent pour EDF de l'ordre de 1 050 t par an (1 039 t/an sur 3 ans de 2010 à 2012), pour un parc de réacteurs inchangé, le stock de combustibles usés s'accroît d'environ 150 t/an, dont 120 t de MOX.

Fin 2012, il y avait à La Hague 9 790 t de combustibles usés entreposés [AREVA2012], dont environ 1 140 t de MOX et 110 t de MOX neufs rebutés. En ajoutant à cela le combustible entreposé dans les piscines de refroidissement des réacteurs EDF, *le tonnage total des combustibles en cours d'utilisation et des combustibles usés entreposés*¹⁹ s'établit, fin 2012, à environ 18 543 t (bilan de 2010) + 2 années à 150 t/an = **18 843 tonnes**.

Comme le retraitement du combustible MOX est long²⁰ et n'a pu être démontré qu'en mélangeant les solutions avec une forte proportion de combustibles oxydes, il est vraisemblable que l'EDF renoncera, à l'échéance de 2017, à retraiter ce combustible, qui devra donc être stocké en l'état.

Compte tenu des surcoûts (ces données ne sont pas publiées) relatifs au retraitement des combustibles MOX, déjà eux-mêmes de fabrication fort coûteuse²¹, de l'important tonnage de combustibles (de tous types) entreposés et de l'importance du stock de plutonium actuel (qui n'est pas autorisé à s'accroître), les scénarios de retraitement de l'ensemble des combustibles sont irréalistes.

2.3 Volumes de déchets du retraitement accumulés fin 2010

Nous considérons les deux principaux types de déchets produits par le retraitement :

- 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,
- les déchets de moyenne activité renfermant des radionucléides à vie longue²² (MA-VL),

Le rapport de l'ANDRA [ANDRA 2012] (fiches 01-HA) indique un total de 2 707 m³ de déchets vitrifiés²³ pour la fin 2010 sans donner le volume des déchets compactés. AREVA fournit, dans ses rapports sur le retraitement des combustibles étrangers, les volumes de déchets vitrifiés (CSD-V) et compactés (CSD-C) dans les ateliers R7, T7 et ACC des usines de La Hague, en précisant la part qui revient à la France.

16 - Les données publiées par EDF [EDF2013] (1 250 t/an) et déduites de celles du CEA [CEA2012a] (1 468 t/an) ne correspondent pas exactement avec celles de l'ANDRA [ANDRA2012] qui décrivent les tonnages entreposés pour chaque famille de combustible (fin 2010). Aussi nous avons été contraints d'évaluer au mieux les tonnages moyens réellement utilisés dans le parc nucléaire (1 200 t/an) afin d'être en cohérence avec le bilan de l'ANDRA : 17,3 t/an pour les 900 MWe (12,3 t/an d'UOx et 5 t/an de MOX), 25 t/an pour les 1300 MWe et 27,9 t/an pour les 1450 MWe.

17 - Cet uranium, qui présente les pollutions résiduelles en PF et actinides, est enrichi en Russie à une teneur de 4,1 %, au lieu de 3,7 % du fait de la présence d'isotopes neutrophages de l'uranium du retraitement. L'usage de l'URE nécessite l'emploi, dans les réacteurs, de 4 grappes de contrôle supplémentaires.

18 - Les 4 réacteurs de la centrale de Cruas (915 MWe) qui utilisent du combustible URE et les 2 réacteurs de Fessenheim (890 MWe) ne sont pas autorisés à utiliser du combustible MOX.

19 - Ce bilan ne prend pas en compte les 104 t de Superphénix et les combustibles métallique de la filière UNGG.

20 - Du fait de la forte teneur résiduelle en plutonium du MOX usé (6,66 % pour du MOX neuf à 8,65 %), le risque de criticité est élevé en phase aqueuse. Cette teneur se traduit par des procédures spécifiques, qui augmentent la durée des opérations. En outre, la forte activité alpha (8,1 fois supérieure à celle d'un Uox) de l'ensemble des actinides dénature rapidement le TBP utilisé pour séparer les produits de fission de l'uranium et du plutonium.

21 - L'OCDE chiffre le coût de la fabrication du MOX à 5 fois celui du combustible UOx [OCDE2005], page 218. Le quotidien Asahi, citant des sources japonaises, donne des coûts de combustible MOX, 6 à 7 fois supérieurs dans ses publications 2013.

22 - Cette appellation vise les radionucléides de demi-vie supérieure à 30 ans.

23 - Dont 2 111 m³ de La Hague, 570 m³ de Marcoule et 26 m³ de combustible de la pile EL4 (Brennilis).

**Tableau 2 : Nombre de colis de déchets vitrifiés et compactés, réalisés à La Hague par AREVA
(Volume des déchets en m³)**

Année	CSD-V	Part française	France (m ³)	CSD-C	Part française	France (m ³)
2007	9088	87,7%	7970 (1435)	6089	46,3%	2819 (507)
2008	9573	90,9%	8702 (1536)	7631	47,8%	3648 (657)
2009	10412	91,2%	9496 (1709)	9010	49,4%	4451 (801)
2010	10828	94,1%	10189 (1834)	10270	52,1%	5351 (963)
2011	11138	96,8%	10782 (1941)	11308	55,0%	6219 (1119)
2012	11665	97,8%	11408 (2053)	11941	57,4%	6854 (1234)

Sources : Rapports AREVA 2007 à 2012

Notas : Le volume unitaire des colis est de 0,18 m³

CSD-V = Colis standard de déchets vitrifiés, CSD-C = Colis standard de déchets compactés

Nous observons, pour l'année 2010, de petites différences entre le bilan ANDRA et AREVA (2707 m³ en 2010 pour l'ANDRA et 1834 m³ pour AREVA). Elles sont dues au fait que l'Andra prend en compte la totalité des volumes vitrifiés, incluant notamment 180 m³ de CSD-V relatives à des solutions de produits de fission issues du retraitement des combustibles en uranium naturel (1966-85) contenant du molybdène (qui doivent être conditionnées²⁴ entre juin 2011 et 2017) alors que les bilans d'Areva ne portent que sur la vitrification réalisée des solutions provenant du retraitement des réacteurs à eau légère.

3. Périmètre des déchets et combustibles nucléaires dédiés à l'enfouissement profond

Nous allons examiner les différentes options, prévues par les organismes impliqués dans la production d'énergie électrique d'origine nucléaire, pour le retraitement des combustibles usés et la gestion des déchets radioactifs produits dans le cycle.

« De quoi va-t-on débattre ? »

• *Pour quels déchets, dans différentes hypothèses d'évolution du secteur énergétique ? »*

À cette première des neuf questions auxquelles la Commission Nationale du Débat Public entend répondre sur le projet Cigéo²⁵, le dossier présenté par l'ANDRA ne présente qu'une seule hypothèse d'évolution du secteur énergétique en matière de production d'électricité d'origine nucléaire : fonctionnement uniforme du parc de réacteurs actuels durant cinquante ans et retraitement intégral de tous les combustibles usés.

La seule variante évoquée est une possibilité d'arrêt du retraitement à une date indéterminée, ce qui amène à une comparaison théorique biaisée des solutions retraitement/non-retraitement. En effet, la solution « non retraitement » étudiée, qui est présentée comme plus pénalisante au niveau espace occupé en solution de stockage en profondeur, intègre tous les combustibles produits, alors qu'environ la moitié des combustibles usés était déjà retraitée²⁶ en 2012.

Cette présentation univoque ne répond pas au principe recommandé par l'ASN dans son avis 2013-AV-0179 du 16 mai 2013, relatif au stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde :

« **Principes à retenir pour l'établissement de l'inventaire :**

Toutefois, cet inventaire devrait prendre en compte l'ensemble des stratégies industrielles aujourd'hui envisagées par les producteurs, en particulier pour ce qui concerne la durée de fonctionnement des réacteurs et leur puissance ainsi que la gestion des combustibles usés du CEA, en intégrant les déchets résultant du traitement de ces combustibles et, s'il y a lieu, les combustibles qui ne seraient pas retraités. »

Ce scénario ANDRA n'est pas enveloppe de l'évolution du secteur de production d'électricité. Un des quatre scénarios envisagé dans le débat national sur la transition énergétique, dit DEC (demande forte et décarbonation par l'électricité) prévoit en effet un doublement du parc nucléaire à l'horizon 2050 avec une croissance limitée des ENR et une stabilité des fossiles²⁷.

Une autre « hypothèse » d'évolution du secteur énergétique a été proposée par l'actuel Président de la République, dans son discours d'introduction à la conférence de l'environnement du 14 septembre 2012 : « *La transition énergétique, c'est la sobriété, mais aussi la diversification des sources de production et d'approvisionnement. J'ai fixé*

24 - [ASN2012], Rapport ASN, Retraitement, chapitre XIII. Les installations du cycle du combustible nucléaire

25 - CNDP – Débat public Cigéo – Journal du débat, avril 2013, N° 1.

26 - Fin 2010, les usines de La Hague avaient retraité 26513 tonnes de combustibles à eau légère dont 16318 t pour EDF. À cette date, 13611 tonnes (LWR) étaient entreposées et 4932 tonnes chargées dans les réacteurs, soit un total de 18543 t. Fin 2012, les usines de La Hague ont retraité plus de 28500 tonnes de combustibles usés, dont 18240 t pour EDF (64 %) [AREVA2012].

27 - Débat national sur la transition énergétique. Rapport du GT2 – Mix et scénarios énergétiques / CNTDE, séance plénière du 23 mai 2013.

le cap : la part du nucléaire dans la production d'électricité sera ramenée de 75 % à 50 % à l'horizon 2025, et cela en garantissant la sûreté maximale des installations et en poursuivant la modernisation de l'industrie nucléaire ».

C'est cette évolution du secteur énergétique que nous proposons d'étudier avec ses deux options, retraitement limité aux besoins des réacteurs dédiés actuellement à l'utilisation du combustibles MOX (22 des réacteurs 900 MWe du parc électronucléaire), ou retraitement intégral de tous les types de combustibles.

Afin d'étudier les hypothèses qui permettent de ramener la *production électrique d'origine nucléaire de 75 % à 50 %* il nous faut définir la valeur de référence. Pour une capacité installée donnée, cette production est liée au « rendement » du parc, appelé « facteur de charge²⁸ », paramètre qui illustre le fonctionnement réel de l'outil de production. Or ce taux, calculé sur tout le parc EDF, varie d'une année sur l'autre (70,97 % en 2010, 75,27 % en 2011, 76,59 % en 2012). Ces variations observées sont importantes, aussi nous avons pris une référence stable : la « *puissance nette installée* ». En 2013, elle est égale à 63130 MWe et sera augmentée en 2017 de 1600 MWe avec la divergence de l'EPR de Flamanville, année où seraient déconnectés du réseau les 2 réacteurs de Fessenheim (2 x 880 MWe, âgés de 40 ans). C'est la réduction d'un tiers de cette puissance installée, par des mises à l'arrêt progressives de tranches nucléaires, que nous considérons dans cet article.

3.1 Les déchets prévus dans CIGEO, version ANDRA²⁹

« Pour établir ces prévisions, il est pris comme hypothèse une poursuite de l'exploitation des installations actuelles avec une durée de fonctionnement de cinquante ans.

Cette hypothèse ne préjuge pas de la décision des autorités publiques d'autoriser ou non un allongement de la durée d'exploitation des réacteurs. Les déchets qui seront produits par les installations nucléaires en cours de construction sont également pris en compte (EPR de Flamanville, réacteur expérimental Jules Horowitz, installation de recherche ITER). »

Avec un flux de retraitement retenu (1050 t d'UOX par an) et l'hypothèse de durée de vie uniforme de 50 ans pour les 59 réacteurs (mise à l'arrêt définitif entre 2027 et 2066), la quantité cumulée de combustibles REP déchargés serait alors voisine de 64000 t (58000 t d'UOX, 4000 t de MOX et 2150 t d'URE). [ANDRA2012, page 52].

Stockage en l'état de combustibles usés :

« L'ANDRA continue, notamment en lien avec le CEA, à mener des études sur le stockage direct de combustibles usés conformément au plan national de gestion des matières et déchets radioactifs, qui lui demande de vérifier, par précaution, que les concepts de stockage retenus par CIGEO restent compatibles avec l'hypothèse de stockage direct si ceux-ci étaient un jour considérés comme des déchets. »

3.2 Les déchets prévus dans CIGEO, version HCTISN

« Pour les déchets issus du fonctionnement du parc de centrales nucléaires actuel, l'inventaire de référence est construit sous l'hypothèse d'une durée de fonctionnement des réacteurs de 50 ans, et du recyclage complet in fine de tous leurs combustibles usés (y compris MOX et URE, qui ne sont pas encore recyclés à ce jour), hypothèse actuellement retenue par le gouvernement et les industriels. L'inventaire de référence comprend ainsi les résidus ultimes du recyclage (produits de fission et actinides mineurs) sous forme vitrifiée. Est exclu de l'inventaire de référence, le plutonium issu du traitement des combustibles usés, car il est pour partie recyclé dans le parc actuel, et pour partie destiné à une éventuelle utilisation dans un futur parc de réacteurs. »

3.3 Le cycle du combustible jusqu'en 2017, version officielle présentée par les exploitants EDF, AREVA et ANDRA à l'ASN³⁰

L'ASN note que, pour la période 2007-2017, le niveau de production électrique d'origine nucléaire retenue est de 430 TWh par an et qu'il n'est pas prévu, durant cette période, de traiter des combustibles usés à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (MOX) ou à base d'uranium issu du traitement de combustibles usés (URE).

Le principe qui sous-tendait le fonctionnement du cycle du combustible présenté dans le dossier « cycle 2000 » n'a pas été modifié dans le dossier « impact cycle 2007 ». Ce principe revient, pour l'oxyde de plutonium, à équilibrer le flux provenant du traitement des combustibles usés avec le flux recyclé dans le combustible à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (MOX).

28 - Le facteur de charge Kp (équivalent anglais : Load Factor) est le rapport de l'énergie effectivement fournie, durant un intervalle de temps déterminé, au produit de la puissance nominale en régime continu, par cet intervalle de temps.

29 - ANDRA - Projet CIGEO - Centre industriel de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse / Haute-Marne. Dossier public du maître d'ouvrage, version du 14 janvier 2013, pages 15 et 16/102.

Haut Comité pour la Transparence et l'Information sur la Sûreté Nucléaire : HCTISN - Rapport préalable au débat public sur le projet de stockage géologique profond de déchets radioactifs, 28 mars 2013, pages 5 et 6/30.

30 - ASN - Lettre CODEP-DRC - 2011-005384 du 9 mai 2011, Cycle du combustible français.

Ce principe permet de limiter la quantité de plutonium présent sous forme séparée dans les installations et d'éviter une dégradation³¹ excessive de celui-ci avant recyclage.

3.4 La position du gouvernement en matière de politique électronucléaire

Engagement N°41 du candidat François Hollande à la Présidence de la république :

« Je préserverai l'indépendance de la France tout en diversifiant nos sources d'énergie. J'engagerai la réduction de la part du nucléaire dans la production d'électricité de 75 % à 50 % à l'horizon 2025 ». François Hollande, élections présidentielle des 22 avril et 6 mai 2012.

Cet engagement a été réaffirmé par le Président de la République le 14 septembre 2012, et repris par le 1^{er} Ministre et la Ministre de l'environnement

3.5 Périmètre des déchets nucléaires dédiés à l'enfouissement profond

Les déchets destinés à CIGEO font donc l'objet de deux définitions antagonistes :

- durée de vie des réacteurs du parc actuel portée à 50 ans et retraitement intégral de tous les combustibles selon les exploitants d'une part (reprise par le HCTISN), et
- réduction de la capacité du parc actuel à 50 % d'électricité d'origine nucléaire (au lieu d'environ³² 75 % actuellement) à l'horizon 2025 selon le gouvernement, avec l'engagement des exploitants AREVA et EDF devant l'ASN, jusqu'en 2017, de ne pas produire plus de plutonium que n'en absorbe la filière MOX actuelle d'autre part.

Comme le plus ancien des réacteurs (Fessenheim 1) aura 50 ans d'âge en 2027, aucun réacteur ne pourrait donc être arrêté à l'horizon 2025, si la 1^{re} règle venait à s'appliquer. Avec une durée de vie de 45 ans la réduction à 50 % ne pourra être atteinte qu'en 2028 et en 2033 pour 50 ans.

À ces choix, il faut ajouter la décision de l'ASN, de poursuivre ou non, *au cas par cas*³³, l'exploitation des réacteurs qui font l'objet de réexamens décennaux. La poursuite de l'exploitation est toujours assortie de nouvelles prescriptions de sûreté qui conduisent à la réalisation de modifications et travaux significatifs. Ce prolongement de l'exploitation pour 10 ans nécessite pour l'exploitant une analyse « coût-avantages ».

Si EDF soutient le projet de prolonger l'espérance de vie des réacteurs à 50 ans, voire 60, le Président de l'ASN souligne toujours³⁴ que le design français des réacteurs a été fait pour 40 ans. « Les 40 ans arrivent rapidement. Comme tous les réacteurs ont été construits à marche forcée entre les années 1980 et 1990, il pourrait y avoir 5 à 6 réacteurs par an à retirer du réseau entre 2020 et 2030. Si telle devait être la situation, il faudra construire des moyens en plus, faire des économies d'énergie... il faut compter une dizaine d'années assez offensives. Donc le message est simple : il est urgent de prendre des décisions dès maintenant, en considérant que les réacteurs ne pourraient aller au-delà de 40 ans ».

4 Choix de la présente étude

Nous allons évaluer les impacts techniques de deux hypothèses :

1. Politique actuelle définie par le Président de la République et appliquée par son gouvernement : 50 % d'électricité d'origine nucléaire à l'horizon 2025.
2. Pas de plutonium en surcapacité (équilibre avec les besoins en combustible MOX) et non retraitement des combustibles URT et MOX suivant la politique industrielle retenue par EDF et AREVA jusqu'en 2017, avec l'accord de l'ASN.

5 Synthèse de données sur les colis matières EDF devant être stockés en site profond dans le projet CIGEO

Nous allons nous intéresser aux seuls déchets de haute activité, conditionnés dans des conteneurs standards de déchets, constitués par les produits qui présentent à la fois des risques de toxicité très élevée et font l'objet d'un important dégagement thermique : les combustibles stockés en l'état, les solutions vitrifiées (CSD-V) et les déchets de structure compactés (CSD-C) :

31 - Un retraitement précoce pollue le plutonium par de l'américium 241, produit par décroissance du plutonium 241 (période $T = 14,35$ ans).

32 - 75,1 % en 2009, 74,1 % en 2010 et 77,7 % en 2011), [CEA2012], Mémento énergie du CEA, 2012.

33 - Le Président de l'ASN, P-F Chevet, a déclaré le 16 avril 2013 à l'Office parlementaire (OPECST) : « Il faut aussi prendre en compte le fait que les centrales nucléaires ont une durée de vie limitée, dont la prévision est difficile et qui ne sera pas nécessairement la même pour tous les réacteurs ».

34 - Pierre-Franck Chauvet, Président de l'ASN, l'Usine nouvelle, 4 octobre 2013.

- *Les combustibles usés* qui comportent trois familles : UOx, URT et MOX. Ce dernier type de combustible fera l'objet, par l'ANDRA, d'un conditionnement spécifique (1 élément combustible utilisé par colis au lieu de 4 pour l'UOx) et d'un enfouissement plus tardif (90 ans au lieu de 60 ans) car son dégagement thermique, après 60 ans de refroidissement, est 4,3 fois supérieur à celui des combustibles UOx.
- *Les solutions vitrifiées* issues du retraitement des combustibles usés à uranium naturel, dont la production a commencé à Marcoule dans les ateliers « PIVER » et « AVM » avec des colis différents de ceux adoptés à La Hague (respectivement 0,065 m³, 0,175 m³ et 0,180 m³). La Hague doit également vitrifier des solutions issues du retraitement des combustibles de type « uranium naturel-molybdène » et conditionner les déchets de maintenance de la vitrification et ceux du démantèlement de l'installation « Elan IIB » dans des conteneurs standards CSD-V.

La Hague et Marcoule ont retraité des combustibles usés de pays étrangers. Les contrats antérieurs à la loi du 30 décembre 1991, concernant les combustibles de réacteurs à eau légère sans clause d'expédition de colis de déchets pour AREVA NC portent sur 512 tonnes retraitées à La Hague. Les combustibles UNGG du réacteur Vandellós (1 913 tonnes) ont également été retraités à Marcoule (88,1 %) et à La Hague [CEA2012c], dont 1 021 t sans clause de retour des déchets. Du combustible canadien de type « Candu » (14 tonnes) a également été retraité à La Hague et les déchets correspondants sont la propriété d'AREVA.

Par analogie, nous pouvons considérer que le solde positif des échanges d'électricité avec les pays frontaliers, qui représente entre 2000 et 2011 la production annuelle de 7 réacteurs d'EDF (17,2 % de la production électrique française d'origine nucléaire), est équivalent à un contrat, sans clause de retour des déchets (Voir Annexe 1). Cette exportation d'électricité représente 219 tonnes par an de combustibles usés.

- *Les déchets de structure* compactés, qui sont constitués de tronçons de gaines cisailées (les coques), des embouts (tête et pied) et des grilles qui ceinturent les assemblages.

5.1 Bilan matières fin 2010- 2012

Nous utilisons, pour bâtir ce bilan, les données publiées dans les rapports d'AREVA sur le traitement des combustibles usés en provenance de l'étranger [AREVA2012] et l'inventaire 2012 de l'ANDRA [ANDRA2012]

- Colis CSD-V issus du retraitement des combustibles de la filière UNGG
Marcoule : (PIVER et AVM), 3 159 CSD-V totalisant 570 m³,
La Hague : 1 028 CSD-V (209 m³ non élaborés)
- Colis élaborés à La Hague ou combustibles LWR entreposés en piscines, à La Hague et à EDF, au 31 décembre 2011

Tableau 3 : Tonnage de combustibles usés, colis de déchets vitrifiés et compactés et plutonium entreposés à La Hague

Année	Combustibles usés à La Hague	Combustibles usés à EDF	CSD-V Nombre (m ³)	CSD-C Nombre (m ³)	Plutonium tonnes
2010	9539 (900)	4081 (387)	10189 (1834)	5351 (963)	60,0 (37,7)
2011	9709 (1040)	4081 (387)	10782 (1941)	6219 (1103)	57,0 (36,2)
2012	9790 (1140)	4081 (387)	11408 (2053)	6854 (1234)	56,0 (37,8)

Sources : [AREVA2010], [AREVA2011], [AREVA2012]

Notas :

1. Le tonnage de combustible MOX figure entre parenthèses. Les chiffres en italiques sont des évaluations. Le tonnage de MOX usé n'augmente pas (ou peu) dans les piscines d'EDF.
2. Aux tonnages de l'ensemble des combustibles usés, entreposés dans les piscines d'EDF, s'ajoute les 4 932 tonnes chargées dans les réacteurs (dont 299 t de MOX).
3. Les colis standards vitrifiés ou compactés à La Hague ont un volume de 0,18 m³.
4. Le tonnage de plutonium entre parenthèses concerne le plutonium français. Le plutonium total, présent en France, était égal à 70 t fin 2010 (60 t à La Hague, 8 t de MOX finis ou en cours de fabrication, 2 t dans les installations du CEA) [ANDRA2012]

5.2 Bilan matières prospectif

Scénario « 50 % d'électricité d'origine nucléaire en 2025 »

Un bilan des matières en 2030, peut être construit à partir des éléments d'orientation connus en 2013, sur la base d'une réduction progressive du parc des réacteurs 900 MWe chargés en MOX, et sur un critère de 40 ans de

fonctionnement, en concordance avec la politique définie par le quinquennat actuel : 50 % d'électricité d'origine nucléaire à l'horizon 2025.

L'annexe 2 fournit la liste des réacteurs 900 MWe concernés, leurs dates d'arrêt à 40 ans d'âge et la réduction nette cumulée de puissance qui en résulterait.

Version 1 :

Non retraitement des combustibles MOX et URE (politique EDF-AREVA NC 2007-2017).

Pas de PuO₂ supplémentaire « sur l'étagère », ce qui conduit à un retraitement limité à 1 050 t/an à partir de 2013 pour le besoin des 22 réacteurs chargés en MOX.

De 1976 à 2010, les usines de La Hague ont retraité un total de 26 513 t de combustibles UOX et MOX usés. Parmi ceux-ci, 9 683 t concernent des combustibles étrangers pour lesquels une clause de retour des déchets de haute activité (déchets vitrifiés et compactés) s'applique. Il en résulte que les déchets produits par les 16 830 tonnes restantes, fin 2010, seront stockés en France.

Version 2 :

Retraitement intégral des combustibles UO₂, URE et MOX

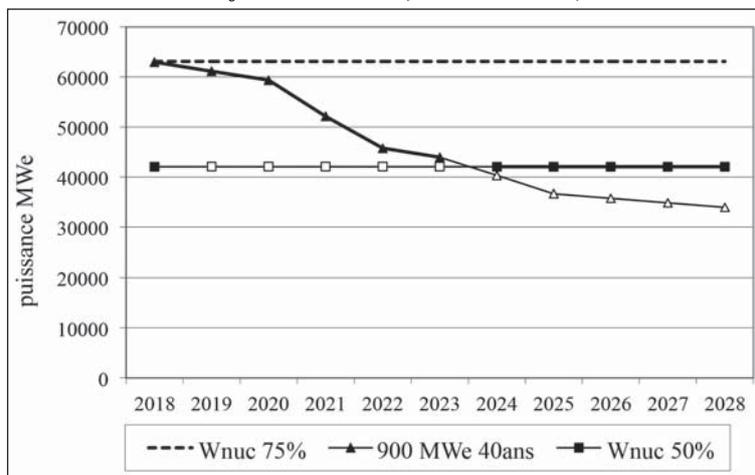
L'objectif de 50 % d'électricité d'origine nucléaire (EON), avec arrêt des réacteurs 900 MWe à 40 ans de fonctionnement est atteint en 2023 avec l'arrêt du 23^e réacteur (Annexe 2). Après la mise en service de l'EPR prévue pour 2017, la puissance installée qui sera alors égale à 64 730 MWe installés (75 % d'EON) serait ramenée à 42 086 MWe (50 % d'EON).

Version 3 :

Durée moyenne de fonctionnement des réacteurs 50 ans

Solution retenue par les exploitants, l'ANDRA et le HCTSIN, avec retraitement intégral des combustibles.

Figure 1 : Évolution de la puissance électrique d'origine nucléaire (Arrêt des réacteurs du parc de 900 MWe à 40 ans de fonctionnement, versions 1 et 2)



5.3 Répercussions sur le cycle du combustible consécutives aux arrêts de réacteurs

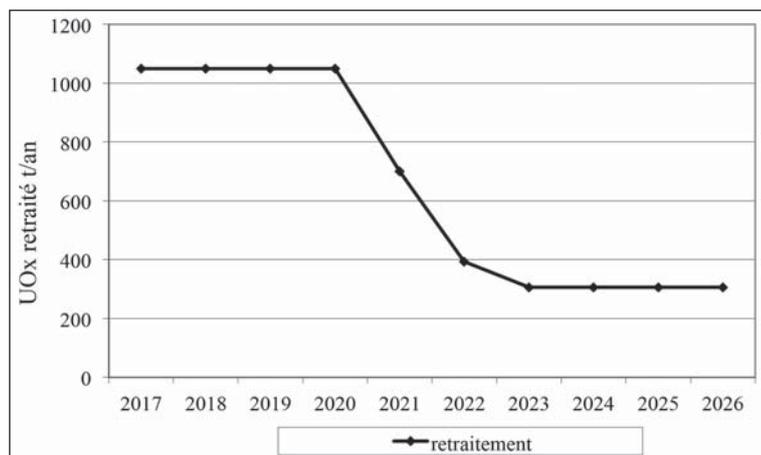
Le fait d'appliquer la double règle d'une durée de vie de 40 ans pour les réacteurs et la limitation du stock de plutonium aux besoins en combustibles MOX, conduit à réduire assez rapidement et de manière importante :

- la fabrication du combustible MOX au fur et à mesure de l'arrêt des réacteurs qui en sont équipés,
- le tonnage de combustibles UOX usés retraité.

Comme huit réacteurs fonctionnant avec du combustible MOX seront arrêtés en 2020 et sept autres en 2021, les besoins en combustibles passeront de 120 tonnes à 35 tonnes. Fin 2022, il restera sept réacteurs 900 MWe fonctionnant avec du MOX. Du fait de cette réduction des besoins en plutonium, le tonnage retraité chutera de manière drastique entre 2019 et 2022. Il passera de 1 050 à 306 tonnes.

Notons que le maintien de la règle d'une durée de vie de 40 ans après 2023, concernera au-delà des réacteurs de 900 MWe, les premiers réacteurs de 1300 MWe.

Figure 2 : Évolution du retraitement en fonction de l'arrêt des réacteurs 900 MWe fonctionnant avec du combustible MOX



5.4 Calculs des masses de combustibles et des volumes de déchets

Nous allons calculer les masses de combustibles, retraité ou non, dans le cas du retraitement adapté aux besoins de réacteurs fonctionnant avec du combustible MOX, puis dans le cas du retraitement intégral. Nous calculons pour cela les flux annuels de combustibles (tonnages déchargés des trois types de combustibles, tonnages retraités et plutonium extrait). Les bilans considérés concernent la fin 2030 et le bilan du cycle actuel (75 % d'EON) avec retraitement intégral de tous les combustibles, au même horizon fin 2030, afin de les comparer aux bilans et prospectives publiés par l'ANDRA dans son inventaire de 2012 [ANDRA2012].

Tableau 4 : Flux des tonnages de combustibles déchargés des réacteurs 900 MWe et entrant dans les piscines de La Hague

Combustibles usés	Tonnage 2010	Tonnage de 2011 à 2017	Tonnage de 2018-2023	Tonnage de 2024-2030	Cœurs déchargés (tonnes)	Bilan 2030 (tonnes)
MOX	1287	840	520	245	240	3132
URE	318	484	415	484	0	1702
UOX	12006	-60	621	2956	720	16243
UOX retraité	16830	7350	4550	2144	-	30874

Nota : Le tonnage négatif correspond à des prélèvements sur le stock en piscines de la Hague si EDF décharge moins de 1050 t/an en combustible UOX de ses réacteurs, correspondant au tonnage retraité en moyenne dans les usines de La Hague.

Tableau 5 : Bilan fin 2030 des combustibles LWR usés retraités ou laissés en l'état et des produits du retraitement

	Poursuite du retraitement actuel 1050 t/an UO ₂			Retraitement total UO ₂ + URE + MOX	
	UO ₂ retraité	UO ₂ +URE non retraité	MOX Non retraité	UO ₂ + URE	MOX
Tonnage 2030	30874t	17945t (16243+1702)	3132t	48819t (47117+1702)	3132t
CSD-V	23156			36614	16443
CSD-C	40137			63465	4072
CU 4 éléments		8973			
CU 1 élément			6424		
Reliquat Pu	37,8t			179,5t	208,6t
URT	29022t			45890t	2767t
U appauvri	454000t				

Nota : Les nombres de colis sont calculés dans l'hypothèse où une tonne de combustible retraitée produit 0,75 colis CSD-V et 1,3 colis CSD-C. Le nombre de CSD-V produits par tonne de MOX retraité (5,25) est supérieur à celui des combustibles UOX du fait de la teneur élevée en émetteurs alpha. Calcul de l'URT : 94 % pour l'UOX et l'URE, 88,34 % pour le MOX (PF 5 % et Pu résiduel 6,66 %)

Notons que le retraitement « intégral », qui double les besoins en surface d'entreposage de l'URT, posera des problèmes dans la mesure où les sites de Bessines et de Limoges sont aujourd'hui proches de la saturation.

5.4.1 Bilan du cycle en 2030

Bilan plutonium

Reliquat 2012 : 37,8 t

Retraitement total UO₂ + URT : 179,5 t (1 % 17945 t)

Retraitement MOX : 208,6 t (6,66 % de 3 132 t)

Le retraitement total conduit à la production d'un stock de plutonium égal à 426 t tonnes.

Ce tonnage est considérable et il n'est pas évident que des réacteurs du futur, qui restent à construire, puissent l'épuiser. Comme dans le monde nucléaire, ce matériau est « tabou », aucune étude connue n'envisage de considérer qu'une fraction plus ou moins grande de ce stock devra être considérée comme un déchet et conditionnée de manière sûre vis-à-vis du risque de toxicité potentielle et de prolifération qu'il présente.

Calcul du nombre d'alvéoles occupées

Nous utilisons les caractéristiques des alvéoles fournies par l'Andra pour les quatre types de déchets :

- Alvéole « déchets vitrifiés » CSD-V, 8 colis/alvéole, pas moyen 10 m

Surface occupée, par alvéole : 400 m² (40 x 10)

- Alvéole « déchets compactés » CSD-C, 10 368 colis/alvéole, pas moyen 30 m

Surface occupée par alvéole : 8 100 m² (270 x 30)

- Alvéole « combustibles usés » CU4 (4 assemblages UOx ou URE) et CU1 (1 assemblage MOX), 4 colis/alvéole, pas moyen 20 m. Surface occupée, par alvéole : 880 m² (44 x 20)

Version 1, retraitement actuel

Tableau 6 : Surface occupée en 2030 dans le cas du retraitement partiel actuel et d'une exploitation des réacteurs de 40 ans

Type de colis	nombre de colis	nombre d'alvéoles	surface occupée (m ²)
CSD-V	23156	2895	1158000
CSD-C	40137	4	32400
CU 4 éléments	8973	2244	1974720
CU 1 élément	6264	1566	1378080
Total			4543200

La surface relative aux combustibles usés et aux déchets de haute activité produits par le retraitement porte sur 4,54 km². La surface attribuable au stockage des combustibles usés est largement majoritaire (73,8 %). Le tonnage de plutonium est égal à 37,8 t.

Version 2, retraitement intégral

Tableau 7 : Surface occupée en 2030 dans le cas du retraitement intégral et d'une exploitation des réacteurs de 40 ans

Type de colis	nombre de colis	nombre d'alvéoles	surface occupée (m ²)
CSD-V	53057	6633	2653200
CSD-C	67525	7	56700
Total			2709900

Dans l'hypothèse du retraitement total, la surface se réduit à 2,71 km² (-40,4 %) mais ce choix est associée une très forte augmentation du tonnage de plutonium qui passe de 37,8 à 426 tonnes. Quel sera l'usage de ces centaines de tonnes de plutonium si les réacteurs du futur ne voient pas le jour ?

Le stock d'uranium de retraitement, passant quant à lui de 29 022 t à 48 657 t (+ 67,7 %).

5.4.2 Le bilan de l'ANDRA pour une durée d'exploitation des réacteurs de 40 ans

Dans son évaluation pour une durée d'exploitation des réacteurs de 40 ans, l'ANDRA évalue la quantité cumulée de combustibles REP déchargés à 52 000 t : 48 000 t d'UOX, 2 800 t de MOX et 1 400 t d'URE Dans l'hypothèse de l'arrêt du retraitement avec le déchargement des derniers 900 MWe, équipés en MOX, atteint par la limite (2018-19), il aura été retraité environ 24 000 t d'UOX [ANDRA2012] (page 54).

Nos évaluations ne diffèrent que de quelques % de celles de l'ANDRA : 51 951 t déchargées (-0,01 %) dont 47 117 t d'UOx (-1,8 %), 3 132 t de MOX (+11,8 %), 1 702 t d'URE (21,4 %). Cependant, pour arrêter tous les 900 MWe équipés de MOX en 2019 (et non 17 réacteurs/24 en 2022), l'ANDRA doit compter l'âge des réacteurs à partir du « début de la construction » et non de la « 1^{re} divergence ».

Version 3, durée moyenne de fonctionnement des réacteurs de 50 ans, avec poursuite de la politique actuelle de retraitement de 1 050 t/an d'UOx

Dans ce cas, l'horizon 2025 est atteint avant d'avoir arrêté le 1^{er} réacteur de 900 MWe, comme le montre l'annexe 2. Le réacteur le plus ancien n'aura 50 ans d'activité qu'en 2027. La réduction à 50 % de l'énergie électrique ne pourrait alors s'opérer qu'au moyen de la fermeture simultanée de 22 réacteurs de 900 MWe. Le bilan donnera donc plus de combustibles UOX retraités et un tonnage plus important de MOX usés. La poursuite de l'exploitation des réacteurs jusqu'à 50 ans repoussera à fin 2032 la réduction à 50 % de la production électrique d'origine nucléaire.

Tableau 8 : Bilan des combustibles cumulés en 2030, dans le cas du retraitement intégral et d'une exploitation des réacteurs de 50 ans

	2010	2011- 2016	2017-2030	2030
MOX	1287	720	1680	3687
URE	318	415,2	968,8	1702
UOX	12006	-236,4	-120,4	11649
UOX retraité	16830	6300	14700	37830
Plutonium non utilisé	37,8			416,5 ^{a)}

a) 37,8 t reliquat 2010 + 116,5 t (1 % des 11 649 t UO₂) + 16,6 t (1 % des 1 662 t URE) + 245,6 t (6,66 % des 3 687 t MOX) = 416,5 t.

Nota : Les valeurs négatives correspondent au tonnage prélevé dans le stock des combustibles entreposés à La Hague, lorsque le tonnage déchargé ne suffit pas aux besoins du retraitement. Le tonnage de plutonium est calculé avec 1 % pour l'UOX et l'URT, 6,66 % pour le MOX.

Tableau 9 : Bilan des colis cumulés en 2030, dans le cas du retraitement intégral et d'une exploitation des réacteurs de 50 ans

	UOX+ URE	MOX	Total
Tonnage 2030	51181	3687	54868
CSD-V	38386	19357	57743
CSD-C	66534	4793	71327

Tableau 10 : Bilan des colis cumulés en 2030, dans le cas du retraitement intégral et d'une exploitation des réacteurs de 50 ans

Type de colis	nombre de colis	nombre d'alvéoles	surface occupée (m ²)
CSD-V	57743	7218	2887200
CSD-C	71327	7	56700
Total			2942900

(+ 416,5 t de plutonium)

Tableau 11 : Bilan des 3 versions à 2030, pour une exploitation des réacteurs de 40 ou 50 ans

	50% d'électricité d'origine nucléaire		75% d'EON et retraitement intégral	Lieu de stockage
	Retraitement adapté	Retraitement intégral (UO ₂ + URE + MOX)		
CSD-V	23156	53057	57713	CIGEO Bure
CSD-C	40137	67525	71276	
CU 4 éléments	8973			
CU 1 élément	6264			
Aire stockage	4,54km ²	2,71km ²	2,94km ²	
Reliquat Pu	37,8t	425,9t	416,5t	La Hague
Tonnage retraité	30874t	51951t	54828t	La Hague
URT	29680t	51033t	51330t	Tricastin et Bessines
U appauvri	454000t			

5.4.3 Bilan à 50 ans selon l'Andra

L'hypothèse de durée de vie uniforme de 50 ans pour les 59 réacteurs conduirait à les mettre à l'arrêt définitif entre 2027 et 2066. Fin 2030, la quantité cumulée de combustibles REP déchargés serait alors voisine de 64 000 t (58 000 t d'UOX, 4 000 t de MOX et 2 150 t d'URE) et le tonnage retraité aura concerné 34 000 t d'UOX, vers 2028-29. Le flux de traitement retenu par l'ANDRA (1 000 t/an d'UOX) permet d'équilibrer le flux de recyclage du plutonium tant que les 22 réacteurs 900 MWe équipés de MOX du parc actuel sont en fonctionnement.

Nos évaluations des tonnages retraités sont inférieures d'une quinzaine de % à celles de l'ANDRA: 54 868 t déchargées (-14,3 %) dont 49 479 t d'UOX (14,7 %), 3 687 t de MOX (7,8 %), 1 702 t d'URE (20,8 %).

6. Conclusions

Le fonctionnement passé, présent et à venir, des réacteurs nucléaires, produit des combustibles « usés » qui sont, soit laissés en l'état, soit retraités en vue d'en extraire le plutonium. Plusieurs stratégies ont été envisagées pour gérer ces combustibles usés ou les déchets de très haute activité (THA) qui résultent de leur retraitement (produits de fission, actinides mineurs et déchets de structure).

Nous avons évalué les tonnages de combustibles laissés en l'état, les volumes de déchets THA qui résulteraient du combustible retraité, et les espaces souterrains couverts, dans l'hypothèse d'un stockage géologique, dans une formation géologique profonde, peu perméable à l'eau, après une longue période de refroidissement dans des installations nucléaires en surface.

Les quantités produites dépendent de la durée d'exploitation des réacteurs nucléaires,

Les travaux effectués sur la transmutation, stratégie visant à réduire l'activité des radionucléides qui présentent la toxicité la plus élevée, montrent que cette voie, inopérante pour les produits de fission de longues périodes, est possible, pour une partie des actinides mineurs principaux (américium et curium). Cependant, les faibles rendements de transmutation rendent cette option longue et coûteuse, ce qui rend peu probable son développement industriel dans un futur proche.

Dans la double hypothèse d'une réduction à 50 % de l'énergie électrique d'origine nucléaire et d'une durée d'exploitation des réacteurs fixée à 40 ans, nous observons que la réduction, annoncée par le Président de la République, est obtenue fin 2022 après l'arrêt du 23^e réacteur de 900 MWe. Comme 17 des 23 réacteurs arrêtés fonctionnent avec des combustibles MOX, il en résultera un impact significatif en aval et amont du cycle du combustible (réduction de la masse de combustible retraitée et de la fabrication des combustibles MOX).

Nous avons évalué l'importance des déchets de très haute activité (THA) issus du retraitement ou des combustibles usés laissés en l'état, suivant diverses stratégies avec pour paramètres l'espérance de vie des réacteurs et la réduction de l'énergie électrique d'origine nucléaire atteinte en 2025, à l'horizon 2030.

Le retraitement intégral des combustibles usés conduit à utiliser des surfaces de stockage géologique inférieures à celles nécessaires au retraitement adapté aux seuls besoins de la production de combustible MOX, car le stockage des combustibles usés obère plus de surfaces. Cependant, le retraitement intégral, pour une durée d'exploitation des réacteurs de 40 ou de 50 ans, produit un tonnage de plutonium supérieur à 400 tonnes. Les surfaces occupées par ces déchets THA, dans un site en profondeur géologique, varient entre 2,7 et 4,5 km², les besoins en aires de stockages de l'uranium de retraitement (URT) passant d'un stock de 29 680 t à plus de 51 000 t en 2030 (+ 72 %), alors que les aires actuelles sont proches de la saturation en 2013.

7. Bibliographie

- [ANDRA2012], ANDRA, Inventaire national des matières et déchets radioactifs, Rapport de synthèse, 212 pages, 2012.
- [AREVA2008], AREVA, Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger, juin 2009.
- [AREVA2009], AREVA, Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger, juin 2010.
- [AREVA2010], AREVA, Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger, juin 2011.
- [AREVA2011], AREVA, Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger, juin 2012.
- [AREVA2012], AREVA, Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger, juin 2013.
- [CEA2012a] CEA, Mémento Énergie, 2012
- [CEA2012b] CEA, Direction de l'énergie nucléaire, Séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue, Centre de Saclay, (88 pages), décembre 2012.

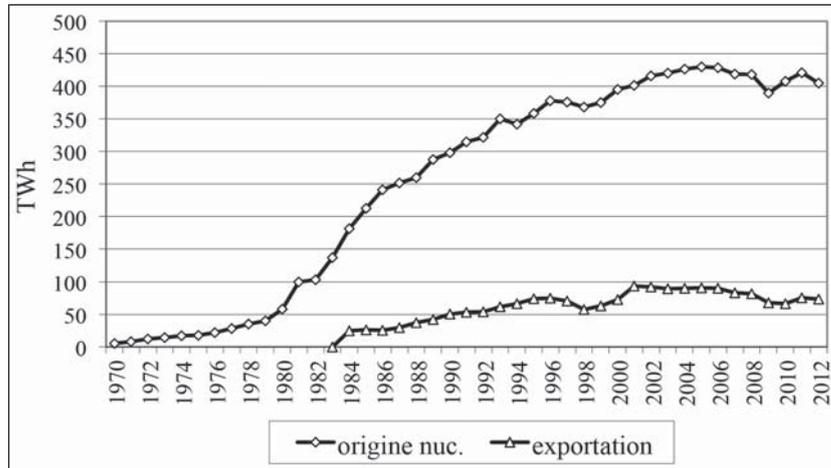
- [CEA2012c] CEA, Informations relatives aux opérations portant sur des combustibles usés ou des déchets radioactifs en provenance de l'étranger, juin 2012.
- [EDF2013] EDF, La gestion des combustibles usés des centrales nucléaires d'EDF, 2013. http://energie.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/En_Direct_Centrales/Nucleaire/General/Publications/NOTE%20COMBUSTIBLE%20USE%202013.pdf
- [GUILLEMETTE2013], Guillemette A, Zerbib JC, Les combustibles MOX d'EDF, production et stockages, bilans 2011, Global Chance, N° 33, pp (66-85), mars 2013.
- [LOUET2011], C.A Louet, Bilan 2009 et 2019 des flux et stocks de matière, Ministère de l'écologie, Direction générale de l'énergie et du climat, 15 septembre 2009.
- [OCDE2005], Coûts prévisionnels de production de l'électricité, page 218, Mise à jour 2005, Éditions de l'OCDE.

Annexe 1

Focus sur la production française d'électricité d'origine nucléaire

Depuis 1982 le solde des échanges d'électricité avec les pays frontaliers est positif. Dès 1991, cette surproduction d'électricité d'origine nucléaire devient supérieure à 50 TWh, production moyenne annuelle de 7 réacteurs (7,09 TWh/an ont été produits en moyenne par réacteur EDF durant la période 2008-11).

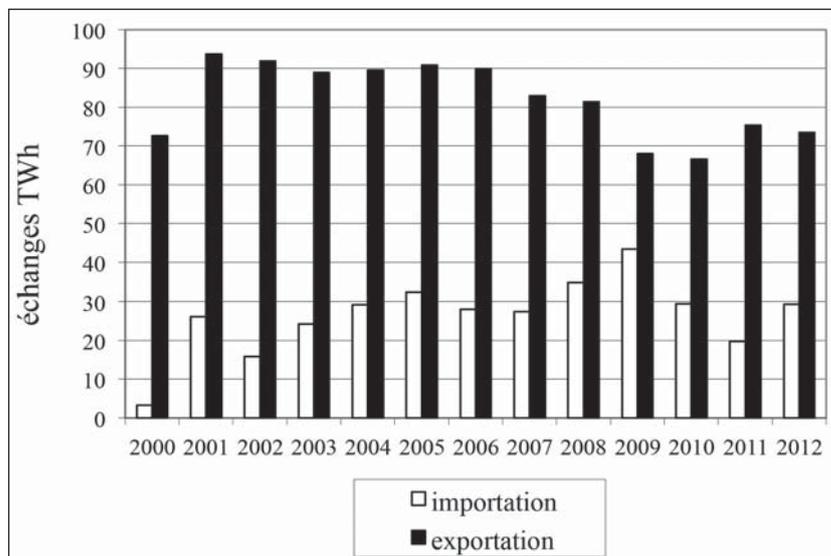
Figure 3 : Historique de la production d'électricité nucléaire et du solde des exportations d'électricité



Sources : Publications ELECNUC CEA et bilans annuels RTE.

De 2000 à 2012, les bilans d'échange d'électricité, publiés par RTE, montrent une constante d'exportation d'électricité supérieure à 70 TWh¹, correspondant à la production moyenne de 10 réacteurs, soit 17,2 % de la production électrique d'origine nucléaire d'EDF.

Figure 4 : Bilan français des échanges d'électricité pour 2000 -2012,



Le fait que 10 réacteurs sur 58 fonctionnent pour la seule exportation d'électricité correspond aussi à la production de 17,2 % de déchets nucléaires (soit 219 t/an) supplémentaires à gérer par l'ANDRA (au nom des contribuables français... et pour les générations futures).

¹ - En base (voir « Bilan des échanges d'électricité 2000-2012 »), l'exportation d'électricité (et non le solde des échanges) a toujours oscillé entre 70 et 90 TWh/an, situation observable depuis le début des années 1990.

Annexe 2

Classement des réacteurs PWR de 900 MWe

Unité	Puissance nette	Puissance brute	Début de construction	Première divergence	Année des 40 ans	Année des 50 ans	1 ^{re} charge en MOX
Fessenheim-1	880	920	1971-9	1977-03	2017-03	2027-03	Non autorisé
Fessenheim-2	880	920	1972-2	1977-06	2017-06	2027-06	Non autorisé
Bugey-2	910	945	1972-11	1978-04	2018-04	2028-04	Non autorisé
Bugey-3	910	945	1973-9	1978-08	2018-08	2028-08	Non autorisé
Bugey-4	880	917	1974-6	1979-02	2019-02	2029-02	Non autorisé
Bugey-5	880	917	1974-7	1979-07	2019-07	2029-07	Non autorisé
Dampierre-1	890	937	1975-2	1980-03	2020-03	2030-03	1990
Gravelines-1	910	951	1975-2	1980-02	2020-02	2030-02	1997
Tricastin-1	915	955	1974-11	1980-02	2020-02	2030-02	1997
Tricastin-2	915	955	1974-12	1980-07	2020-07	2030-07	1996
Gravelines-2	910	951	1975-3	1980-08	2020-08	2030-08	1998
Gravelines-3	910	951	1975-12	1980-11	2020-11	2030-11	1989
Tricastin-3	915	955	1975-4	1980-11	2020-11	2030-11	1996
Dampierre-2	890	937	1975-4	1980-12	2020-12	2030-12	1993
St Laurent B1	915	956	1976-5	1981-01	2021-01	2031-01	1987
Dampierre-3	890	937	1975-9	1981-01	2021-01	2031-01	1998
Blayais-1	910	951	1977-1	1981-05	2021-05	2031-05	1997
Gravelines-4	910	951	1976-4	1981-05	2021-05	2031-05	1989
St Laurent B2	915	956	1976-7	1981-05	2021-05	2031-05	1988
Tricastin-4	915	955	1975-5	1981-05	2021-05	2031-05	1997
Dampierre-4	890	937	1975-12	1981-08	2021-08	2031-08	1998
Blayais-2	910	951	1977-1	1982-06	2022-06	2032-06	1994
Chinon-B-1	905	954	1977-3	1982-10	2022-10	2032-10	2000
Cruas-1	915	956	1978-8	1983-04	2023-04	2033-04	Non autorisé
Blayais-4	910	951	1978-4	1983-05	2023-05	2033-05	2013
Blayais-3	910	951	1978-4	1983-07	2023-07	2033-07	2013
Chinon-B-2	905	954	1977-3	1983-09	2023-09	2033-09	1999
Cruas-3	915	956	1979-4	1984-04	2024-04	2034-04	Non autorisé
Gravelines-5	910	951	1979-10	1984-08	2024-08	2034-08	2008
Cruas-2	915	956	1978-11	1984-08	2024-08	2034-08	Non autorisé
Cruas-4	915	956	1979-10	1984-10	2024-10	2034-10	Non autorisé
Gravelines-6	910	951	1979-10	1985-07	2025-07	2035-07	2008
Chinon-B-3	905	954	1980-10	1986-09	2026-09	2036-09	1999
Chinon-B-4	905	954	1981-2	1987-10	2027-10	2037-10	1998

Sources : CEA, OPECST, EDF, ASN et Légifrance

Séquences d'arrêts : 2 réacteurs en 2017, 2 en 2018, 2 en 2019, 8 en 2020, 7 en 2021, 2 en 2022. En 2017, date d'arrêt du premier réacteur, le réacteur EPR de Flamanville devrait entrer en fonction dans le réseau EDF.

Réduction cumulée de la puissance nette : 1,76 GW en 2017, 3,58 GW en 2018, 5,34 GW en 2019, 12,595 GW en 2020, 18,94 GW en 2021 et 20,755 GW en 2022.

La réduction de 25 % de la puissance nette installée est atteinte en 2023, après l'arrêt du 23^e réacteur de 900 MW (Chinon B1).

Annexe 3

Tonnages de combustibles retraités dans les usines de La Hague

(Tonnes de métal lourd initial)

Année	UP2-400	UP2-800	UP3	EDF	Total
1976	14,62				14,62
1977	18,02				18,02
1978	38,22				38,22
1979	79,40				79,40
1980	104,86				104,86
1981	101,29				101,29
1982	153,55			11,5	153,55
1983	221,25			0	221,25
1984	255,06			0	255,06
1985	351,38			0	351,38
1986	332,77			0	332,77
1987	424,91			0	424,91
1988	345,64			150	345,64
1989	430,27		30,33*	375	460,60
1990	331,05		124,57+70,08*	300	525,70
1991	311,12		351,42	300	662,54
1992	224,64		448,24	224	672,88
1993	353,83		601,42	320	955,25
1994	317,29	258,58	700,43	651	1276,29
1995	0	758,08	800,56	758,08	1558,64
1996	12,42	849,61	818,86	849,61	1668,47
1997	0	849,62	820,29	849,62	1669,91
1998	27,12 + 4,92 MOX	779,61	821,87	779,61	1633,53
1999		848,64	712,86	848,64	1561,52
2000		810,33	387,17	810,33	1197,50
2001		733,46	217,15	733,46	950,61
2002		550,65	509,91	?	1060,56
2003		707,33	407,86	?	1115,20
2004		449,58 +10,64 MOX	640,67	?	1100,89
2005		683,48	429,22	?	1112,70
2006		300,58 +16,49 MOX	698,12	?	1015,19
2007		425,04 +31,34 MOX	490,20	?	946,58
2008		293,63 + 5,13 MOX	638,48 + 0,082 RTR	?	937,31
2009		242,53	686,44	928,97	928,97
2010		X ?	Y ?	1 048,92	1 048,92
Total	4453,62	9604,35 + X	11406,34 + Y	16318	26513,24

Notas : * = tonnage de combustible dissous dans UP2-800 et transféré dans UP3 via un "tuyau" reliant les deux usines. Tous les tonnages sont, par convention, relatif au poids du métal lourd initial (U-Pu).

Sources : Données Cogéma et AREVA fournies au GRNC (Groupe Radio-écologie Nord-Cotentin).

De 1976 à 2010, les usines de La Hague ont retraité 26 513 tonnes de combustibles LWR, dont 68,5294 t de combustible MOX et 0,1895 t de combustibles de réacteur de recherche à haut taux de combustion (285 à 309 GW). Les 68,53 t de combustible MOX étranger ont été retraitées dans UP2-400 et UP2-800 (92,8 %) entre 1998 et 2008.

Le tonnage LWR et BWR retraité est donc égal à 26 444 tonnes. Seuls les déchets vitrifiés et compactés produits par le retraitement de 9 683 t de combustibles étrangers seront renvoyés aux clients par Areva. La première série de contrats passés avec des clients étrangers, qui portait sur 512 t, n'est pas soumise à ce retour. Le stockage définitif concernera donc les déchets produits par 16 830 tonnes de combustibles usés dont 16 318 t concernent EDF.

CIGEO, une faisabilité en question

Bertrand Thuillier

Avant-propos

Même si ce projet a été présenté initialement sous la forme d'un laboratoire auprès des populations locales, il n'est plus question maintenant de douter de la nature du projet Cigéo qui sera bien un stockage des déchets nucléaires; ces derniers, appelés déchets MAVL et HAVL, respectivement déchets Moyenne Activité à Vie Longue et Haute Activité à Vie Longue concentreront une partie importante de la radioactivité totale des déchets et des matières nucléaires dangereuses produits en France.

Il nous a par conséquent semblé impérieux de revenir sur ce projet qui pourra concerner et présenter des impacts pour beaucoup de français, par des nuisances continues locales, mais également par des risques économiques au niveau régional, et enfin par des risques de sécurité au niveau national; en effet, pour ce dernier point, en cas d'incendie, des contaminations aériennes seraient importantes sur tout l'est de la France et pourraient contaminer également des affluents de la Marne, et par voie de conséquence présenter des impacts sur l'alimentation en eau des franciliens.

Également en avant-propos, il est à noter que tous les éléments présentés dans cet article sont issus des dossiers Argile 2005 et Argile 2009 du maître d'œuvre Andra, l'Agence chargée de la gestion des déchets radioactifs en France; ce choix a été délibéré afin que nous restions dans une information la plus factuelle et la plus proche des promoteurs de ce projet.

Trois volets sont abordés, correspondant à trois types d'impacts:

1. Les nuisances avec leurs impacts locaux, en commençant par la construction du site,
2. Les impacts économiques portant sur la dégradation des terroirs régionaux, et enfin,
3. Les risques de sécurité durant la période d'exploitation.

Avant de présenter ces éléments, une brève description du stockage est rappelée pour une meilleure compré-

hension, mais il sera bien entendu possible de se référer au dossier du maître d'œuvre pour préciser certains de ces éléments, le cas échéant.

I – La description du projet

I-1- La construction

Le stockage représente actuellement la construction à partir de 2019 d'une centaine de kilomètres de galeries, sur une surface souterraine de l'ordre d'une quinzaine de kilomètres carrés. Cette structure nécessitera l'extraction de 7 à 8 millions de m³ de roche, soit annuellement durant la période de construction environ 550 000 m³ de terre à excaver, 825 000 m³ de terre à transporter en raison du foisonnement (décompression de la terre excavée), et 275 000 m³ de béton à fabriquer.

I-2- Les déchets

Trois types de déchets seront stockés:

- Les déchets dits « MAVL » 70 000 m³ en volume non conditionnés, mais 350 000 m³ en colis conditionnés ou 171 530 colis, dont 74 370 d'enrobés bitumineux
- Les déchets dits « HAVL » 10 000 m³ en volume non conditionnés, mais 30 000 m³ en colis conditionnés ou 60 000 colis.
- Des combustibles usés, non compris dans les inventaires actuels de Cigéo, mais qui pourraient constituer 90 000 m³ en colis conditionnés ou 57 000 assemblages selon les études 2005.

I-3- Les transports

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 (100 à 120 ans), soit plus de 100 000 wagons.

I-4- Les installations de surface

Deux types de zones sont à distinguer :

- 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, viendra compléter cette zone où sera déposée toute la terre excavée.
- Une zone dite « Puits », de 200 ha environ, est prévue pour regrouper les 4 puits de la structure : un pour les travaux, un pour le personnel, et les deux puits de sortie d'air.

I-5- Les installations souterraines

Deux types d'alvéoles sont prévues en fonction des déchets à stocker :

- Des alvéoles dites « HAVL » horizontales, reliées par des galeries d'accès, d'une longueur d'environ 100 m, elles sont 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 poussage des colis HAVL jusqu'au fond de ces alvéoles.
- Des alvéoles dites « MAVL » de 6 à 9 m de diamètre et d'une longueur de 375 à 525 m ventilées avec des retours d'air vers les galeries de liaison ; ces sortes de tunnels, munis d'équipement de manutention sur rails, permettront le stockage de différentes formes parallélépipédiques de colis en béton.

II – Les nuisances et les impacts locaux

II-1- Emprise

Il est en premier lieu étonnant de constater une différence importante entre les surfaces nécessaires aux zones prévues (440 ha) et les réservations et achats de terres dès 2008 en Meuse et en Haute-Marne ; en effet, les réserves foncières de l'Andra au 31.12.2012 s'élevaient à 790 ha (440 ha en Meuse et 340 ha en Haute-Marne)¹.

On ne peut s'empêcher de penser, même si des démentis oraux ont été donnés en 2012, que ces surfaces pourraient être utilisées pour de futurs entreposages complémentaires car on pouvait lire dans les documents de 2009 : « Certains besoins au-delà de 2025 pourraient être assurés par des capacités d'entreposage intégrées au centre de stockage, au lieu de la création ou de l'extension d'installations sur les sites de production ou de conditionnement² ». ou encore, « doter le site de stockage de capacités d'entreposage, en complément à celles du site de la Hague, serait susceptible d'accroître la flexibilité de gestion d'ensemble

1 - Source CLIS du 22.02.2013

2 - Argile 2009 : Concepts d'entreposage, p. 138

des colis. À l'inverse, cela conduirait à anticiper les transports entre le site de la Hague et le centre de stockage, pour une même date de mise en stockage³ ».

Ces extensions d'entreposage de refroidissement pourraient apparaître en complément du projet de stockage qui comportera de toute manière un entreposage tampon permanent pour des raisons logistiques évidentes de gestion des flux en arrivées et en départs.

Notre première interrogation porte sur l'information des populations, qui jusqu'à présent, étaient informées uniquement de la présence d'un laboratoire ; on peut rappeler à ce sujet les écrits de M. Bruno SIDO en 2004 : « à Bure, la situation est claire : les collectivités et les populations locales ont accepté un programme de recherche qui prend fin en 2006 et rien d'autre!⁴ »

Ont-elles réellement conscience de l'emprise d'un tel complexe industriel dans des cantons ruraux dont les nuisances vis-à-vis d'une population de plusieurs milliers d'habitants ont été estimées par la Commission Nationale d'Évaluation, avec par exemple, le passage quotidien de 200 camions, la consommation de 500 m³ d'eau par jour, et le rejet de 2800 tonnes de déchets industriels par an ?

II-2- La question des transports

Si l'on poursuit le possible cours du projet Cigeo, il est prévu un démarrage de l'exploitation en 2025, et par voie de conséquence, le début des transports de ces déchets et des possibles contaminations :

« Le scénario de mise en stockage des déchets HA et des combustibles usés, actuellement envisagé..., prévoit un flux dans les installations nucléaires de surface pouvant aller d'une centaine de colis à 500 colis primaires par an. Les premiers colis primaires HA pourront être réceptionnés dès la première décennie d'exploitation... (et) de 1 000 à 5 000 colis primaires MAVL par an⁵ ».

« Des contrôles de non-contamination des emballages de transport, des colis et des hottes seront réalisés systématiquement, les seuils d'acceptation pourraient être ceux de la réglementation des transports, à savoir une contamination labile (non fixée, limitée à 4 becquerels/cm² en émetteurs bêta, gamma et 0,4 becquerels/cm² en émetteurs alpha)⁶ ».

Mais on apprend à la lecture des dossiers que « en 2007 des analyses réalisées sur 110 colis (B³.3.6) ont cependant révélé une contamination significative (supérieure à 4 Bq/cm²) pour 36 colis. La contamination moyenne relevée sur ces 36 colis était de 126 Bq/cm² et la contamination maximale de 1 000 Bq/cm²... Cette contamination avait pour origine la présence de corrosion perforante sur certains colis ou encore des soudures de couvercles présentant des défauts⁷ ».

Par ailleurs, dans l'inventaire 2005, figurent « cinq toxiques chimiques présentent potentiellement de l'im-

3 - Argile 2009 : Concepts d'entreposage, p. 147

4 - B. SIDO - La lettre des Entretiens Européens, 2^e sem. 2004

5 - Argile 2009 : Surêté, p. 107, p. 110, p. 115

6 - Argile 2005 : Architecture, p. 440

7 - Argile 2009 : Référentiel partie 2, p. 165

portance compte tenu de leur teneur et de leur toxicité (et/ou effets cancérigènes)... pour les voies par ingestion et/ou inhalation :

le bore (311 à 771 tonnes),

l'antimoine (9 à 11 tonnes),

le nickel (2031 à 2800 tonnes),

le sélénium (3 à 4 tonnes), et

l'uranium (300 à 32 154 tonnes)⁸ », 32 154 tonnes, pour le scénario S2 de 2005.

Il apparaît également que la manutention de ces très nombreux transports peut être la source de contamination des installations, et par conséquent de l'environnement :

« La manutention des colis primaires pourrait être la cause de leur chute et de leur endommagement, et les conséquences envisageables seraient une ouverture d'un (des) colis primaire(s) et une dispersion de matières radioactives⁹ ».

Ces transports de 100 trains de 10 wagons environ par an pendant 100 ans, soit 10000 trains, entraîneront inévitablement des contaminations radioactives qui seront principalement concentrées sur les voies d'accès au site (voies ferrées et gares, en particulier).

1. Est-il alors normal d'appliquer cette même réglementation générale des transports au vu d'une telle fréquence de passages et de colis ? (en considérant 5000 colis uniquement et dans les limites de la réglementation, on arrive déjà à des niveaux de radioactivité non fixée de l'ordre de 800 millions de Becquerels¹⁰ sur les voies ferroviaires et les routes de Haute-Marne/Meuse arrivant au stockage).
2. Comment s'assurer que lors de tous ces transports, il n'y ait pas un seul accident, ou un seul choc, et que des matières radioactives ou ces toxiques extrêmement dangereux ne soient rejetés dans l'environnement ?
3. Comment ne pas douter de l'innocuité pour les riverains et pour les usagers de ces voies de transport, en pensant tout particulièrement aux élèves présents en gare, aux personnels de la SNCF, et aux voyageurs qui seront en contact quotidien avec ces convois ?

II-3- Les rejets gazeux

C'est une nuisance qui n'avait jusqu'alors jamais été communiquée aux populations locales. La question de ces rejets gazeux n'avait même pas été soulevée par les organismes chargés de l'information, comme le CLIS de Bure, avant 2012.

Ces éléments sont cependant bien présents dès les dossiers de conception de 2005 ; une pollution atmosphérique multiple constituée de radioéléments gazeux, d'aérosols radioactifs, de poussières, de fumées sera engendrée du fait de l'impérieuse nécessité de ventiler l'ensemble des alvéoles de stockage et des galeries d'accès et de travaux (ventilation globale de 500 à 600 m³/s).

8 - Argile 2005 : Évolution, p. 432

9 - Argile 2005 : Architecture, p. 449

10 - Contamination surfacique calculée moyenne par colis par 5000

En effet, un grand nombre de colis de déchets MAVL ne peuvent et ne pourront être rendus étanches en raison de leur génération d'hydrogène (plusieurs centaines de milliers de L/an). On apprend à ce sujet dans les dossiers de l'Andra les faits suivants :

« En considérant que l'accumulation excessive d'hydrogène dans les conteneurs B (par radiolyse) peut entraîner un risque de rupture des colis, ceux-ci sont donc conçus pour laisser échapper l'hydrogène¹¹ »... « ainsi, « les colis B2.3 (15780) et B2.5 (46690) sont composés d'une enveloppe (fût) en acier inoxydable contenant l'enrobé bitumineux. Ces déchets sont constitués de boues issues du traitement chimique d'effluents liquides radioactifs, séchées et enrobées dans du bitume... Ces enveloppes sont fermées de manière non étanche à l'aide de couvercles clipsés... et une attention particulière est donc portée à la maîtrise des risques liés à la présence de l'hydrogène dans l'air des alvéoles et des galeries¹² ».

En effet, « dans le cas où la teneur en hydrogène de l'atmosphère de l'alvéole serait supérieure à la limite d'explosivité (4 % d'hydrogène), un renouvellement de l'atmosphère de l'alvéole doit être effectué¹³ »... et il est ajouté, « comme pour l'hydrogène, les gaz radioactifs qui peuvent être relâchés par les colis de déchets MAVL (tritium, krypton 85, carbone 14, chlore 36) sont totalement évacués par l'air de ventilation¹⁴ », « les alvéoles de déchets B sont ventilées durant toute leur phase d'exploitation, et jusqu'à leur fermeture. La durée de ventilation après mise en stockage pourra varier entre le temps nécessaire au remplissage de l'alvéole (fermeture immédiate) et quelques années à plusieurs dizaines d'années, voire davantage, en fonction des choix en matière de gestion réversible du stockage¹⁵ », « l'air extrait en fond d'alvéole est évacué par une gaine jusqu'en surface via le puits de retour d'air de la zone MAVL... L'installation d'un étage de filtres industriels à l'introduction d'air et d'un étage de filtration « très haute efficacité » (THE) à l'arrière de l'alvéole... rendraient plus complexes la configuration du réseau d'aérogation et induiraient des opérations de maintenance supplémentaires de maintenance (filtres...)¹⁶ ». « L'architecture du stockage... inclut deux puits de retour d'air, l'un dédié spécifiquement à la zone de déchets MAVL, le second assurant le retour pour le reste des installations. Ils permettent d'évacuer les débits d'air vicié importants mis en jeu (plusieurs centaines de m³/s) et l'évacuation des fumées en cas d'incendie¹⁷ ».

Même si en 2012, cette absence de filtres THE a été démentie oralement, on peut se poser la question de la maintenance de ces filtres en aval des alvéoles et du

11 - Argile 2005 : Stockage, p. 112

12 - Argile 2009 : Référentiel partie 2, p. 41

13 - Argile 2005 : Architecture, p. 424

14 - Argile 2009 : Concepts d'entreposage, p. 282

15 - Argile 2005 : Évolution, p. 186

16 - Argile 2009 : Conception, p. 61

17 - Argile 2009 : Sécurité, p. 195

comportement et de l'efficacité de ces filtres essentiellement à base de cellulose en atmosphère humide.

L'Andra a également répondu en 2012 que ces rejets seraient minimes et soumis à autorisation, mais a-t-on estimé à sa juste valeur cette très importante pollution atmosphérique sur l'environnement proche, voire assez lointain selon les dominances des vents, avec les particules fines ?

On peut douter de ces estimations car, si l'on reprend les caractéristiques de chacun des types de colis prévus où sont mentionnés les rejets gazeux par an et par colis, et que l'on multiplie ces rejets par le nombre de colis estimés dans l'inventaire, on arrive par exemple pour l'Iode 129 au chiffre incroyable de 113 tonnes de rejets par an¹⁸.

Les populations à proximité sont-elles conscientes de ces relargages de gaz, et des dépôts de radionucléides qui se retrouveront ensuite concentrés dans toute la chaîne alimentaire (eau, cultures, pâtures, faune sauvage, potagers...)?

Ces contaminations sont confirmées quand on sait par ailleurs que l'OPE (Observatoire Pérenne de l'Environnement) répond à une demande de mesures autour du site, sur une surface de 900 km², concernant les rejets de Chlore³⁶, Sélénium⁷⁹, Iode¹²⁹, Radium²²⁶, Arsenic, Bore, Mercure¹⁹, et que cette même directive européenne Euratom recommande également un suivi sanitaire²⁰ des populations sur cette même surface.

III – Les aspects économiques et les impacts régionaux

Notre démarche s'inscrit délibérément dans une approche de coût global ou de coût complet de ce projet ; ces coûts, bien entendu non exhaustifs, ont été approchés ou catégorisés selon trois axes :

- Un coût direct, qui est le coût estimé pour la création et l'exploitation du stockage,
- Un coût potentiel incluant la question de la réversibilité, en raison des incertitudes sur ces déchets,
- Un coût environnemental ou coût d'image, qui est à différencier selon les territoires concernés, mais qui impacte essentiellement le niveau régional.

III-1- Coût direct du site

Si on reprend les documents du dossier « Argile 2005 », il apparaît que « le coût indicatif du stockage est de l'ordre de 15 milliards d'euros en fonction des hypothèses retenues, le coût pourrait encore être modifié à ce stade²¹ » ; en effet, quand on observe les documents de 2011, les coûts estimés ont déjà été multipliés par deux : « Le coût du stockage souterrain avait été chiffré en 2005 à 14,1 milliards d'euros (2003) par la DGEMP³ (actuelle DGEC), soit 16,2 milliards d'euros (2010). Les chiffres qui sont aujourd'hui avancés sont sensiblement supérieurs. On cite les chiffres de 20 à 35 milliards d'euros (2010)²² ».

Il nous a semblé néanmoins utile de comparer ces estimations avec les coûts du seul site comparable en exploitation dans le monde, le WIPP (Waste Isolation Pilot Plant). Cette comparaison est d'ailleurs issue des documents de l'Andra : « L'ensemble de quatre puits... peut se comparer au WIPP qui pour une profondeur comparable (650 m au lieu de 500 m), mais pour des flux moins importants (volume d'excavation annuel de quelques dizaines de milliers de mètres cubes, pas de béton, colis moins encombrants) comporte également quatre puits²³ ».

Ce projet américain qui reste très modeste en volume (10 fois plus petit en volume excavé annuellement)²⁴ coûtera au contribuable américain de l'ordre de 19 milliards de dollars²⁵.

Il est ainsi facile de comprendre qu'il semblerait plus juste d'estimer les coûts du projet français entre 100 à 200 milliards d'euros.

III-2- Coût potentiel de la réversibilité

La possibilité d'un arrêt du principe d'enfouissement des déchets nucléaires est déjà encadrée par la loi, et reste demandée dans les débats publics sous le terme de réversibilité. Mais cette réversibilité, qui reste à démontrer techniquement, ne semble malheureusement pas encore estimée, ni même provisionnée. Ainsi il est noté : « Le financement d'une opération éventuelle de retrait de colis ouvre une problématique à explorer d'ici 2015 : le financement d'une telle opération doit-il être assuré par la génération qui décidera de construire et d'exploiter un nouveau module de stockage, par exemple en constituant une provision pour une opération éventuelle de retrait futur, ou bien par la génération qui déciderait ultérieurement une opération de retrait de colis ? Cette question renvoie aux motivations possibles de la décision de procéder à un retrait de colis : objectif de valoriser un déchet, émergence de nouvelles techniques, choix sociétaux²⁶... ».

On apprend également plus loin que le problème risque même de retomber à terme sur les collectivités locales : « La loi de 2006 fournit une structure de financement pour la recherche et la construction et l'exploitation de stockage et d'entreposage... Cependant, ces fonds ne couvrent pas le retrait potentiel des colis. Cette absence de financement spécifique pour le retrait entame la crédibilité de la notion de réversibilité... le coût associé au stockage et à sa réversibilité ne doit pas invalider des éventuelles options alternatives, ni incomber aux territoires d'accueil²⁷ ».

18 - Argile 2009 : Référentiel partie 2, p. 265

19 - ANDRA/OPE Appel à projets SOERE2012-2013, p. 3

20 - Euratom SRA Topic : Monitoring of the Environmental Reference State (6.3)/ Health Surveys.

21 - Argile 2005 : Stockage, p. 107

22 - CNE 2011-n°5, p. 29

23 - Argile 2005 : Architecture, p. 296

24 - Argile 2005 : Architecture, p. 261

25 - http://www.powermag.com/nuclear/The-U-S-Spent-Nuclear-Fuel-Policy-Road-to-Nowhere_2651.html

26 - Argile 2009 : Réversibilité, p. 24

27 - Argile 2009 : Réversibilité, p. 99

Comment serait-il alors possible que les territoires d'accueil, à savoir les départements de Haute-Marne et de Meuse, et respectivement, les régions Champagne-Ardenne et Lorraine puissent prendre à leur charge de tels montants en cas de nécessaire réversibilité (accidents, incendie, contaminations souterraines, législation d'interdiction d'enfouissement, par exemple)?

Il est certain que cette absence de financement remet en cause l'existence même d'une possible réversibilité.

III-3- Coût environnemental régional

Le coût environnemental de la dégradation de l'air et des terrains (sol, contamination de l'herbe, des forêts avoisinantes, des cultures) n'est pas encore chiffrable en compte de bilan dans une comptabilité publique et/ou en dédommagements écologiques en terme de dégradation patrimoniale environnementale. Mais en restreignant l'analyse aux seules activités humaines financiarisées, il apparaît que dans les deux régions touchées, cette dégradation pourrait toucher des marques et des terroirs bien valorisés. En effet, la région Lorraine et la région Champagne-Ardenne sont caractérisées par des terroirs d'excellence, l'une par la qualité de ses eaux minérales, avec des marques comme Contrex, Vittel et Hépar, et l'autre par l'appellation champagne avec également des marques prestigieuses bien connues.

Est-ce que la valorisation des marques de champagne ne serait pas écornée avec un sous-sol champenois ainsi pollué? Si on ne devait, par exemple, ne prendre que la marque « Moët et Chandon », celle-ci est estimée en 2011 à 4,383 milliards de dollars²⁸. Il n'est pas inutile de rappeler la chute malheureuse de la marque Perrier²⁹ suite à quelques pseudo traces de benzène, qui a eu un effet considérable et désastreux auprès des consommateurs américains.

C'est alors toute l'activité associée au champagne qui représente un chiffre d'affaire en 2011 de 4,4 milliards d'euros, avec un total de 30 000 emplois directs, auxquels s'ajoutent environ 120 000 travailleurs saisonniers durant la période des vendanges, qui serait touchée...

Il suffit à ce propos de rappeler les paroles de Jérôme Quiot, Président du syndicat général des vignerons des Côtes-du Rhône en 1995 :

« Faire du site de Marcoule le lieu d'enfouissement des déchets ultimes de la filière nucléaire... ferait courir un très grand risque à l'image de nos vins auprès des consommateurs. », et plus loin, appelle à « éloigner de notre zone de production un projet très dangereux pour notre appellation²⁹ ».

Il existe un exemple encore plus récent, celui du vignoble des coteaux du Tricastin qui a été obligé de changer de nom: « Les viticulteurs du Tricastin, qui bénéficiaient d'une AOC depuis 1973, cherchaient depuis des années à se démarquer du complexe

nucléaire implanté à partir de 1974-1975 dans trois communes voisines. Une série d'incidents sur ce site, à l'été 2008, a précipité leur décision. Malgré un cortège d'analyses démontrant l'absence de radioactivité suspecte dans le vignoble, l'appellation a perdu 40 % de son volume en deux ans³⁰ ».

Pourra-t-on alors faire de même : changer le nom de la région pour éviter que celui-ci ne salisse l'image de nos grandes marques de champagne ?

Pourra-t-on ne pas voir ces cohortes de journalistes « twitter » à la terre entière lors de l'arrivée des milliers de colis radioactifs, quand on a constaté que le passage d'un seul convoi (dernier transport de déchets de la Hague vers Gorleben fin novembre 2011³¹) a mobilisé autant de rancœurs et de contestations ?

Que pèseront alors les explications de l'ANDRA face à une communication subtile des autres vignobles, californien, australien, péruvien, qui sauront, bien entendu, habilement utiliser nos erreurs ?

IV- La sécurité d'exploitation du stockage

Trois risques sont abordés dans ce chapitre : les expositions du personnel à des risques multiples et variés, les risques d'explosions, et le risque d'incendie. Tous ces risques sont détaillés, mais certains nous semblent réellement pouvoir conduire à des situations difficilement gérables, hors dimensionnement, comme par exemple, une situation critique d'incendie de longue durée, qui pourrait être totalement hors contrôle.

IV-1- Les risques pour le personnel

Le personnel aura à opérer dans un environnement doublement délicat par le caractère confiné et très poussiéreux du milieu souterrain (comme dans tous travaux miniers avec engins), mais également, par la présence de multiples sources radioactives potentielles. Ces sources sont constituées de la contamination surfacique non fixée des colis primaires, des gaz radioactifs, mais aussi des débits de dose à proximité. Le risque peut même être très simplement d'entrer par inadvertance dans une des nombreuses zones plus ou moins sensibles, et accessibles selon les moments.

Pour tous ces points, il est en effet assez étonnant de lire les propos suivants concernant le personnel: « Les principaux risques conventionnels à prendre en considération sont, au cours du processus de stockage, le risque d'écrasement de personnes consécutif à une chute de charges, une chute de blocs en galeries, une chute d'objets en puits, le risque d'écrasement par un équipement, le risque de heurt par un engin, le risque de collision entre engins, le risque de chute lié à des travaux en élévation (notamment en puits), le risque d'électrification et le risque d'incendie... Maintenant existent également des risques inhérents à l'ambiance

28 - <http://www.interbrand.com/fr/best-global-brands/best-global-brands-2008/best-global-brands-2011.aspx>

29 - <http://brandfailures.blogspot.com/2006/12/brand-pr-failures-perriers-benzene.html>

30 - http://www.lemonde.fr/planete/article/2010/06/09/les-vignerons-du-tricastin-vont-rebaptiser-leur-aoc_1370014_3244.html

31 - <http://www.spiegel.de/politik/deutschland/0,1518,800489,00.html>

de travail (bruits, poussières, gaz carbonique et monoxyde de carbone émis par les engins...)³² ».

Il est également ajouté : « Le risque potentiel d'origine chimique, pour les installations de surface et les concepts d'entreposage, a pour principales origines :

* Le gaz d'échappement des engins diesels acheminant les lorrys dans le hall de réception...

* Les gaz toxiques émis par les colis MAVL,

* Tous les produits chimiques susceptibles d'être utilisés dans l'installation... et entreposés. », avec comme résultat : « Les conséquences potentielles pour l'homme sont l'intoxication, l'irritation des muqueuses, l'asphyxie et l'exposition à des produits cancérigènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction... Le personnel n'interviendra pas en fonctionnement normal dans les locaux où le risque de relâchement de gaz toxiques ou irritants sera élevé. Le risque d'exposition du personnel aux gaz d'échappement ne peut pas être écarté dans le hall de réception des emballages de transport, à ce stade des études³³ ».

On apprend également que « Les risques de dispersion de substances radioactives résultent du transfert des hottes contenant un colis de stockage de type MAVL ou HA et de leur mise en alvéole de stockage. Durant ces opérations, du personnel est présent dans les ouvrages de liaison surface/fond, dans les galeries de liaison et d'accès³⁴ », et « En fonctionnement normal, ce risque est dû à la contamination labile externe des hottes et des colis de stockage, et à l'émission de radionucléides gazeux par les colis de déchets³⁵ ».

S'y ajoutent les risques suivants : « les principaux événements redoutés susceptibles de conduire à un risque de dissémination sont la chute d'un colis ou d'une charge sur un colis, l'incendie³⁶ ». « Ces événements peuvent potentiellement entraîner une contamination des locaux où sont manutentionnés les différents colis, conduisant à une exposition interne des travailleurs et à un rejet dans l'environnement ».

On comprend à la lecture du dossier que « le dimensionnement des protections radiologiques est basé sur les caractéristiques des substances radioactives (rayonnements émis, activités radiologiques, débit de dose) et les modalités d'exposition (temps d'exposition, distance par rapport aux substances radioactives, écrans...) du personnel et du public³⁷ », mais que « pour certaines situations qui nécessitent des interventions à proximité des sources radioactives qui n'ont pas une protection radiologique suffisante, la distance de l'intervenant par rapport, à la source et le temps d'intervention, pourront être utilisées comme mesures de protection³⁸ ».

32 - Argile 2005 : Architecture, p. 445

33 - Argile 2009 : Sécurité, p. 144

34 - Argile 2009 : Sécurité, p. 211

35 - Argile 2009 : Sécurité, p. 212

36 - Argile 2009 : Sécurité, p. 129

37 - Argile 2009 : Sécurité, p. 218

38 - Argile 2009 : Sécurité, p. 219

Il semble que les risques se multiplient également dans le cas des opérations de fermeture des alvéoles qui prévoient un arrêt volontaire de la ventilation. Il est noté à ce propos que « la durée de fermeture des alvéoles peut conduire à une formation d'atmosphères explosives au sein de l'alvéole en raison de l'arrêt de la ventilation. Cette situation présente un risque d'explosion qui pourrait endommager les équipements et blesser le personnel en charge de ces opérations. Une solution envisagée est de prévoir l'inertage de l'alvéole pendant ces opérations permettant ainsi de s'affranchir d'une explosion... L'inertage de la zone (consiste au) remplacement de l'oxygène (comburant) par un gaz inerte (l'azote)³⁹ », et on apprend en note de bas de page que « les dangers associés à la manipulation de l'azote dans un milieu confiné, notamment le risque d'anoxie pour le personnel, seront évalués au cours des études détaillées. »

Enfin, nous avons été réellement surpris de lire ces mots : « dans quelques cas (incendie avec déstratification des fumées et vitesse d'évacuation lente), on ne peut exclure à ce stade que les personnes pourraient être rejointes par les fumées et devraient utiliser leurs protections respiratoire et oculaire individuelles... si les personnes sont bien formées et disposent des moyens adéquats pour intervenir efficacement en cas d'incendie, elles parviennent généralement à éteindre le feu avant qu'il n'ait eu le temps de se développer⁴⁰ ».

À la lecture de ces phrases assez déconcertantes, on peut décemment se poser la question de la protection du personnel en cas d'incidents ou d'interventions dans les alvéoles (panne d'un engin télé-opéré, chute de colis...). Quelles procédures et par qui seront elles vérifiées ?

IV-2- Les risques d'explosion

Les risques d'explosion sont très présents du fait de la génération continue d'hydrogène, conséquence de la radiolyse des colis ; en effet, en cas de dépassement de plus de 4 % d'H₂ dans tout espace qui ne serait pas correctement ventilé (alvéole, galerie, hotte, colis), la moindre étincelle qui pourrait être issue, par exemple, d'une batterie défaillante et non étanche, d'un éclairage cassé, d'huile sur un moteur trop chaud, voire même des systèmes de contrôles et de surveillance eux-mêmes, peut produire une explosion.

Cette génération continue d'hydrogène concerne tout particulièrement les colis de type B2 avec une production totale de l'ordre de mille m³ d'H₂/an. Cette production interdit, par voie de conséquence, tout arrêt de la ventilation (y compris pour fermer les alvéoles) durant une période de plus de 6 à 10 jours, et indépendamment de tout incident/accident/incendie qui pourrait arriver durant la durée séculaire de l'exploitation.

Les dossiers de conception de l'Andra témoignent de l'importance de ces risques : « Les conséquences potentielles de ces dégagements de gaz de radiolyse sont :

39 - Argile 2009 : Sécurité, p. 229

40 - Argile 2005 : Architecture, p. 465, p. 466

- La formation d'atmosphères explosives dans l'enceinte où sont placés les colis : une explosion peut survenir, en présence d'une source d'ignition, si la concentration dans l'air du gaz dépasse sa Limite Inférieure d'Explosivité - La LIE est de 4 % pour l'hydrogène et de 5 % pour le méthane.
- La surpression au sein du colis de stockage pouvant conduire à sa rupture (voire explosion) en fonction de sa... capacité à évacuer les gaz produits ».

C'est pourquoi, non seulement, il est bien prévu de dimensionner la ventilation aux locaux, et de prévenir le risque de surpression au sein des colis de stockage, mais il est également noté qu'il « est prévu d'évacuer l'hydrogène par le béton du couvercle et/ou de la paroi du colis... voire par des événements positionnés dans le haut du corps du colis si nécessaire. »⁴¹, et qu'« en cas de dépassement des seuils d'alarmes (sur le taux d'hydrogène et/ou sur le débit de ventilation) l'installation sera mise en état sûr et le personnel évacué »⁴¹, mais que « la perte de la ventilation pourrait conduire à un risque d'explosion dans les locaux abritant des colis émetteurs d'hydrogène consécutivement à l'atteinte d'un taux d'H₂ supérieur à 4 %. Une explosion pourrait entraîner la perte d'une fonction de confinement⁴² ».

Tout repose par conséquent sur la ventilation : « Les délais disponibles pour rétablir la ventilation en cas d'arrêt avant d'atteindre le critère de 1 % d'hydrogène dans l'alvéole sont variables... pour une valeur moyenne de 10 l/fût/an... le délai est de 10 jours... et pour une alvéole de colis B4.1 relâchant 100 l/fût/an... le délai disponible est à une valeur inférieure à 6 jours⁴³ ». Alors, à la question logique concernant le temps de la remise en état du système de ventilation, on se met à ressentir une inquiétude certaine quand on lit : « Au stade actuel, un délai de plusieurs jours pour intervenir et remettre en service les systèmes de ventilation associés à ces alvéoles semble le plus vraisemblable... les délais pour réaliser une intervention importante dans un milieu confiné difficile d'accès sont à estimer pour différents scénarios dégradés afin d'être en mesure de se prononcer sur leur compatibilité avec la maîtrise du risque d'explosion⁴⁴ ».

Mais ce n'est pas tout : « Les sources de danger vis-à-vis du risque d'explosion sont principalement la présence d'appareils sous pression et le dégagement d'hydrogène lors de la charge des batteries... Concernant la présence de batteries, la prévention du risque d'explosion lié à la charge des batteries repose sur le respect de la réglementation en vigueur, notamment sur l'utilisation des batteries étanches et une ventilation adaptée de l'atelier de charge⁴⁵ ».

On pourrait penser que tout cela sera bien surveillé, mais le système de surveillance lui-même constitue un danger dans ce contexte : « C'est aussi, la mise en œuvre du système d'auscultation (qui) veillera à

éviter la production d'étincelles, notamment dans les alvéoles susceptibles de produire de l'hydrogène. Les éventuelles sources d'énergie, notamment des batteries permettant une transmission sans fil, sont plus particulièrement concernées par ce risque⁴⁶ ».

Si les risques d'explosion sont traités et évités par une très forte ventilation des alvéoles et des galeries, comment s'assurer que, sur une durée séculaire d'exploitation, il n'y ait pas une seule interruption de quelques semaines de cette ventilation dans tout espace du stockage ?

Comment dans un tel projet, avec tous ces véhicules, ces engins de manutention, les éclairages, et tous ces systèmes de contrôle, éviter la moindre étincelle fatale en présence de l'hydrogène omniprésent, une accumulation dans des parties non ventilées s'avérant toujours possible ?

IV-3- Les risques d'incendie

Les risques d'incendie sont sans doute les risques les plus graves et les plus difficiles à gérer par la présence concomitante de l'hydrogène (de l'ordre de 1000 m³ produits par an), des colis inflammables (de l'ordre de 10000 tonnes de bitume pur au total), et de cette forte ventilation obligatoire (plusieurs centaines de m³/s) pour justement évacuer l'hydrogène et les gaz radioactifs. La maîtrise d'un incendie dans un tel environnement souterrain serait particulièrement délicate à gérer du fait des difficultés d'accès des pompiers, de la difficulté de gestion de l'importante ventilation (arrêt nécessaire, progressif, mais aussi extraction nécessaire des fumées), et des restrictions d'utilisation de l'eau pour ne pas augmenter la criticité de certains colis. Les conséquences seraient alors encore plus sensibles du fait de la fragilisation possible des structures en béton, de la levée du confinement de substances radioactives dans certains secteurs, mais aussi, d'une possible contamination.

Ces risques sont majeurs et ne sont pas minorés par l'Andra. On peut en effet lire que « c'est dans ce contexte que l'Andra a porté une attention particulière au risque d'incendie, pour lequel le contexte souterrain peut être un facteur aggravant⁴⁷ », et il est ajouté pour le limiter : « la prévention passe par le contrôle et la limitation des produits inflammables ».

Mais on peut difficilement ne pas relever une contradiction quand on apprend que loin de participer à cette limitation, les colis eux-mêmes inflammables, contribuent à l'extension du risque : « Le colis de boues bitumineuses a été retenu (dans un scénario d'incendie) parmi les différents colis B parce qu'il est celui qui présente le plus de risques d'ignition (Données spécifiques relatives aux conditions de température : Enrobé bitumineux : Auto-inflammation à 350 °C)⁴⁸ », et que « Ces colis d'enrobés bitumeux présentent la particularité de ne pouvoir être entreposés qu'en position verticale, afin d'éviter le risque d'extrusion du bitume hors du conte-

41 - Argile 2009 : Sûreté, p. 138

42 - Argile 2009 : Sûreté, p. 147

43 - Argile 2009 : Sûreté, p. 226

44 - Argile 2009 : Sûreté, p. 227

45 - Argile 2009 : Sûreté, p. 143, p. 144

46 - Argile 2005 : Architecture, p. 393

47 - Argile 2005 : Stockage, p. 29

48 - Argile 2005 : Architecture, p. 467

neur par fluage⁴⁹ ». En effet, des études récentes (Thèse de Mouhamad MOUAZEN du 15/09/2011 sur l'évolution des propriétés rhéologiques des enrobés bitume) ont montré que le volume initial de ces enrobés pouvait augmenter jusqu'à 70 % sous l'effet de l'irradiation et la présence de sels.

Et il est noté, pour confirmer ces risques que « le bitume présente un risque d'inflammation qui peut impliquer des mesures spécifiques de prévention ou de protection pour limiter la température à moins de 120 °C en conditions accidentelles ».

La question de la température est donc cruciale, et serait très dommageable en cas d'incendie car on apprend d'une part que :

- « la température limite à ne pas dépasser pour le bitume (colis primaires MAVL d'enrobés bitumeux) est de 40 °C en situation normale et de 50 °C en situation incidentelle⁵⁰ », mais également, d'autre part

- en ce qui concerne les structures de béton : « la température à ne pas dépasser pour le béton (colis primaires MAVL avec coques béton, colis de stockage MAVL et murs) est de 70 °C en situation normale, et de 80 °C en situation incidentelle/accidentelle. Au-delà de ce seuil, la stabilité du béton change... et (présente alors) un risque de fissuration à terme. »⁵¹ ; et on sait par ailleurs que « le retour d'expérience sur des incendies en milieu souterrain donnent des températures généralement comprises entre 800 et 1200 °C⁵¹ ».

On peut prendre conscience du risque d'occurrence d'un incendie, non seulement dans les installations souterraines, « Dans la zone de stockage MAVL... la situation d'incendie est plus difficile à écarter et fera l'objet de simulations complétées d'essais d'ici à la DAC⁵² » (DAC : Demande d'Autorisation de Création du stockage), mais également dans les installations de surface, quand on lit : « L'acheminement des emballages sur lorrys depuis le terminal ferroviaire jusqu'au hall de réception des emballages par des engins diesel présente les opérations qui peuvent générer les incendies les plus importants... Les locaux qui présentent les risques d'incendie susceptibles de contaminer les installations et de relâcher des substances radioactives dans l'environnement concernent les lignes de déchargement et de conditionnement des colis primaires, ainsi que la capacité d'entreposage de transit des colis de stockage MAVL⁵³ ».

Devant cette aussi forte probabilité d'occurrence d'un incendie, on a peine à croire ce qui est écrit : quelques heures dans cette centaine de kilomètres de galeries pour évacuer le personnel, faire venir les secours, arrêter la ventilation, et maîtriser le feu... avant que les structures ne se dégradent : « La conception des galeries devra permettre leur résistance au feu pour ne pas

aggraver les situations d'incendie envisagées⁵⁴ ». « La structure-porteuse des installations du fond est conçue pour rester stable au feu 2 heures et n'être que faiblement altérée par un incendie⁵⁵ ». « La tenue au feu des murs, structures et galeries sera supérieure à 2 heures pour l'évacuation de personnel, l'accès des secours et la protection des équipements sensibles⁵⁶ ». « Dans le cas d'un incendie en alvéole MAVL, la ventilation est arrêtée progressivement... une sectorisation de cette zone est envisagée ».

Enfin, on apprend et on relèvera une certaine honnêteté de l'Andra quand on nous prévient, que dans certains cas, il n'y aura pas de solutions : « Les incertitudes sur les résultats des simulations thermiques impliquant l'incendie d'un véhicule transportant un colis de stockage d'enrobés bitumeux, ne permettent pas à ce stade de s'affranchir du risque de relâchement radioactif en cas d'incendie⁵⁷ ».

Qu'en serait-il alors en cas d'incendie d'une alvéole, cathédrale de stockage de 450 m de long et de 9 m de diamètre, pouvant contenir des centaines de tonnes de bitume pur, avec de l'hydrogène, les batteries des engins de manutention (stockeurs et ponts gerbeurs), et la ventilation ?

Devant ces risques d'incendie, comment ne pas penser aux conséquences éminemment dommageables pour l'environnement d'un incendie de longue durée si des infrastructures étaient touchées et les galeries d'accès contaminées ?

Est-ce que la nature de ce risque ne remet pas en cause la faisabilité même de l'enfouissement d'une telle concentration de déchets et de fait, du projet Cigéo lui-même ?

49 - Argile 2009 : Concepts d'entreposage, p. 242

50 - Argile 2009 : Sécurité, p. 137

51 - Argile 2005 : Architecture, p. 469

52 - Argile 2009 : Sécurité, p. 216

53 - Argile 2009 : Sécurité, p. 139

54 - Argile 2009 : Sécurité, p. 233

55 - Argile 2009 : Sécurité, p. 234

56 - Argile 2009 : Sécurité, p. 235

57 - Argile 2009 : Sécurité, p. 236

Éléments de conclusion et recommandations

Le document que nous avons présenté met en évidence une série de questions et fournit des éléments de réponse que nous présentons en conclusion de ce travail.

1. On ne sait pas qu'en faire, faut-il continuer d'en produire ?

Effectivement, 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 que « 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 et 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 de l'environnement de l'Allemagne 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 de 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 réduit 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. A tout le moins, il est en tout cas indispensable de réduire 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 en France).

- Ne pas exporter d'électricité d'origine nucléaire (actuellement la production 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 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.

2. Des déchets radioactifs et des matières radioactives sont produits dans toutes les activités du combustible nucléaire et en particulier le retraitement. Quel en est le bilan ?

Il y a effectivement une grande quantité et une grande variété de déchets déjà produits. Pour s'en tenir à ceux résultant de la production d'électricité à partir de la chaleur produite dans les réacteurs nucléaires, on trouve d'abord les combustibles irradiés qui sont entreposés dans les piscines voisines des réacteurs, puis dans la grande piscine de La Hague, en attente du retraitement (production de plutonium, séparation de l'uranium restant, dit uranium appauvri de retraitement, produits de fission et actinides autres que le plutonium). Le retraitement des combustibles irradiés qui permet cette séparation des composants des combustibles irradiés engendre de nouvelles catégories de déchets (tout en réduisant la quantité de combustibles irradiés): les verres qui renferment les produits de fission et les actinides hors plutonium et sont entreposés pour plusieurs dizaines d'années à La Hague, des déchets liés aux opérations de retraitement (gainés des combustibles, boues de traitement des effluents, équipements usés radioactifs, etc.), du plutonium non réutilisé dans les combustibles MOX. Il faut également noter que le retraitement ne s'applique qu'aux combustibles à uranium naturel enrichi, tandis que les combustibles MOX ne sont pas retraités et restent stockés dans les piscines de La Hague. Il faut ajouter à cette liste déjà longue les résidus des mines d'uranium exploitées en France dans le passé, l'uranium issu du retraitement des combustibles irradiés (24 000 tonnes fin 2010), l'uranium appauvri issu de l'enrichissement de l'uranium naturel (271 000 tonnes accumulées fin 2010), les déchets des usines de fabrication des combustibles (notamment du combustible MOX). Soulignons par ailleurs que l'utilisation du plutonium dans les combustibles MOX ne diminue la quantité de plutonium (entre combustible

neuf et combustible irradié) que de 20 % environ et que les combustibles MOX irradiés, outre le fait qu'il ne peuvent pas être retraités industriellement dans les conditions actuelles, sont beaucoup plus chauds et radiotoxiques que les combustibles irradiés issus de combustibles à uranium enrichi.

Pour les déchets de faible activité (qui proviennent actuellement surtout des usines de retraitement et des centrales nucléaires mais auxquels il faudra ajouter beaucoup de déchets provenant du démantèlement des réacteurs nucléaires lorsqu'ils seront arrêtés, il existe actuellement trois centres de stockage en surface gérés par l'Andra à Soulaire, Morvilliers et La Hague (centre de stockage de la Manche).

Ces différents stockages et entreposages posent des problèmes (notamment pour le centre de La Manche), mais la situation la plus critique concerne l'entreposage des combustibles irradiés (en particulier MOX) dans les piscines des centrales nucléaires et surtout celle de La Hague qui contient environ l'équivalent de cent chargements complets d'un réacteur de puissance (environ 1 000 MW de puissance électrique). En effet, ces piscines ne sont pas sécurisées vis-à-vis des agressions extérieures naturelles, terroristes ou militaires), situation qui ne peut perdurer et a été soulignée par l'autorité de sûreté nucléaire (ASN).

On a ainsi toute une gamme de déchets, depuis des matières entreposées dont une partie sera retraitée (les combustibles à uranium) jusqu'aux résidus des mines, en passant par toutes les catégories qui se distinguent par leur activité (haute activité HA, moyenne activité MA, faible activité FA) et la durée de vie (on parle de « demie vie » qui est le temps au bout duquel la quantité initiale du produit concerné a été réduite de moitié), celles-ci allant jusqu'à des centaines de milliers d'années pour certains produits.

Les déchets radioactifs prévus pour le stockage dans Cigeo (HAVL, les verres stockés à La Hague, et MAVL, en conteneurs de bitume ou de béton) ne constituent donc qu'une partie minoritaire de l'ensemble des déchets et matières nucléaires (non seulement en volume mais aussi en radioactivité) actuellement sur le territoire, que ceux-ci soient appelés dans le langage « nucléaire » déchets radioactifs ou matières « valorisables » (comme le plutonium), puisqu'on sait qu'une très grande partie de ces matières ne sera probablement pas valorisée.

C'est en particulier le cas pour le plutonium qui est présent à la fois « sur les étagères » de La Hague et dans les combustibles MOX irradiés

Ce qui paraît de la première urgence est d'assurer la sécurité des stockages et entreposages actuels, avant de se lancer dans des opérations de stockage en profondeur. Ajoutons pour être complets que la France, qui a choisi le retraitement, ne retire qu'un millier de tonnes de combustible irradié par an, alors que nos centrales en « produisent » 1 200 tonnes. Il y a donc

accumulation progressive de combustibles irradiés non retraités qu'il va falloir entreposer dans des conditions de sécurité acceptables.

3. Le stockage de déchets radioactifs en profondeur dans la croûte terrestre est-il acceptable ?

Il est aventureux de prétendre « imaginer l'inimaginable » 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 à très long terme ? Et, quelles que soient les précautions prises, information ou non, suffisamment de bouleversements de toute nature peuvent provenir pour que la seule mémoire reste 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. Sous-sol riche en matières premières, en ressources énergétiques et surtout lieu de circulation et de stockage de l'eau, indispensable à la vie sur la Terre.

De la même façon que des conventions internationales (convention climat, protocole de Montréal, convention OSPAR) 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 que les nôtres et qu'une convention internationale verra bientôt le jour, interdisant le stockage en profondeur de tout déchet toxique ou radioactif.

Enfin, 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.

4. Le projet CIGEO présente-t-il des risques pendant toute la durée de son exploitation ?

A 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 l'évaluation séparée des situations d'anomalies ou de défaillances, et leurs niveaux envisageables. Cette évaluation est déjà extrêmement difficile, 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, équipements, 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 32 types différents définis dans l'inventaire ANDRA 2012), ainsi que les critères de leur acceptation pour le stockage CIGEO. Très fortes interrogations sur les déchets bitumés¹ 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

¹ - Les déchets bitumés ont une charge radioactive très forte et ils produisent des gaz radioactifs (les déchets bitumés à Marcoule seraient totalement à reconditionner pour être même transportés).

(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.

La question des moyens de fermeture des alvéoles est d'autre part 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 par exemple en conclure que l'on ne doit pas accepter des déchets bitumés ou des déchets produisant de l'hydrogène.

Tous ces risques ont, bien entendu, 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 d'intervenir vite par conséquence, une décision malheureuse en réaction et l'on se trouve dans des situations incontrôlables :

- intervention trop tardive, et les galeries sont trop dégradées pour être accessibles aisément ;
- pas assez d'eau, et l'incendie se développe, trop d'eau, et on augmente le risque de criticité ;
- trop de ventilation, pour éliminer les fumées, mais le feu s'étend, un arrêt de la ventilation, et alors l'hydrogène s'accumule et augmente le risque d'explosion...

5. La récupérabilité des déchets, composante technique de la réversibilité, est une obligation. Qu'en est-il en réalité ?

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 par exemple 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 évidemment encore bien plus 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 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 selon le type de colis sont elles envisagées ? Ces remises en état éventuelles sont elles envisagées 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 elles envisagées ?

- Réintroduction éventuelle des colis dans les galeries

La réintroduction des colis inspectés et/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 ?

- Gouvernance et risques pour les riverains

Qui va prendre les décisions de récupération de colis et sur quelles bases ? Quelles garanties sont apportées aux populations riveraines, à la société, d'avoir un pouvoir d'influencer les décisions ? Quelles mesures de protection des populations riveraines en cas d'exhaure de colis plus ou moins abîmés ?

6. 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 actuel, l'entreposage pérenne en sub-surface.

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 » 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 (techniquement à peu près impossible, financièrement très élevé), et en outre, cela ne « supprime » pas les déchets. Cela diminue simplement la durée de vie d'une partie des déchets (de 10 000 ans à... quelques centaines d'années). La transmutation est encore étudiée par le CEA, mais cela ne concerne qu'une infime partie des déchets. Et le débat de 2006 a conclu que ce ne pouvait pas devenir une solution industrielle pour les dizaines de milliers de tonnes de déchets existants.

Mais le fait que cette voie de recherche paraisse décevante n'est pas une justification pour ne pas poursuivre les efforts de réduction de 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 (centres de stockage Andra de Soulaïnes, Morvilliers, la Manche) et n'est pas sans poser des problèmes: il devrait être « contrôlé » pendant au moins 300 ans, voire 800 car il contient parfois du plutonium.

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 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 (l'équivalent du 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, comme cela a été souligné par l'Autorité de sûreté nucléaire est la sécurisation de ces piscines, en premier lieu celle de La Hague.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de solution satisfaisante pour la gestion des déchets. Celle qui paraît la moins mauvaise paraît être le « stockage à sec en sub-surface ».

Il y a dans la dénomination « stockage à sec en sub-surface » deux composantes: l'entreposage à sec qui est une technique et la sub-surface 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: ils 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. Ce sont des déchets HA-VL (haute activité, vie longue).

- Le plutonium issu lui aussi du retraitement et non utilisé pour faire des combustibles MOX (un stock de 56 tonnes environ à La Hague fin 2012, dont 18,2 t issues de combustibles usés d'origine étrangère) est lui aussi entreposé à sec « sur les étagères » à La Hague (le plutonium est très dangereux en cas d'inhalation ou d'ingestion mais émet peu de rayonnement gamma et n'a pas besoin d'être refroidi).

- Les déchets MA-VL (moyenne activité, vie longue) 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, en Allemagne et surtout aux États-Unis, les combustibles usés (ou combustibles irradiés) qui 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 58 réacteurs des centrales nucléaires françaises) est la première centrale à avoir adopté le stockage à sec pour ses combustibles usés.

Quant à la « sub-surface », il s'agit de stocker les combustibles irradiés des centrales sans aucun retraitement dans des galeries creusées à faible profondeur, on dans le flanc de montagnes granitiques. De la sorte, on facilite la surveillance, et on garantit la possibilité d'extraire ces combustibles dans le cas d'une solution technique. C'est la solution préconisée (avec quelques variantes) par la plupart des pays nucléarisés.

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.

Bon à renvoyer avec votre règlement à : Association Global Chance, 17 ter rue du Val, 92190 Meudon

Email : contact@global-chance.org / Site internet : www.global-chance.org

Abonnements : www.alternatives-economiques.fr puis «Boutique» puis «Autres publications»

<p><i>Les Cahiers de</i></p>  <p>GLOBAL CHANCE</p>	<p>NOM :</p> <p>ORGANISME :</p> <p>ADRESSE :</p> <p>CODE POSTAL :</p> <p>TELEPHONE :</p>	<p>VILLE :</p> <p>EMAIL :</p>
---	---	---

N°		15 €	10 €	15 €	15 €	15 €	15 €	10 €	15 €	15 €	15 €	10 €	15 €	12 €	10 €	10 €	10 €	
		x	x	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	
33	Des questions qui fâchent ; Contribution au débat sur la transition énergétique (03/13)																	
32	L'efficacité énergétique à travers le monde : sur le chemin de la transition (10/ 2012)																	
31	L'énergie et les présidentielles : décrypter rapports et scénarios (03/2012)																	
30	L'énergie en Allemagne et en France : une comparaison instructive (09/2011)																	
29	Nucléaire : le déclin de l'empire français (04/ 2011)																	
28	La science face aux citoyens (12/ 2010)																	
27	Du gâchis à l'intelligence : le bon usage de l'électricité (j01/ 2010)																	
26	Vers la sortie de route? (01/ 2009)																	
25	Nucléaire : la grande illusion. Promesses, déboires et menaces (09/2008)																	
24	De Grenelle à Bali : avancées, incertitudes, contradictions et perspectives (03/ 2008)																	
23	Énergies renouvelables, développement et environnement (04/2007)																	
22	Débattre publiquement du nucléaire ? bilan des débats EPR et Déchets (11/ 2006)																	
21	Développement, énergie et environnement : changer de paradigme (05/ 2006)																	
20	Les utopies technologiques (02/ 2005)																	
19	Climat, énergie : éviter la surchauffe (07/ 2004)																	
18	Le réacteur nucléaire EPR : un projet inutile et dangereux (01/ 2004)																	
<i>Disponibilité des numéros antérieurs : contact@global-chance.org</i>																		
n°Hors Série																		
4	Petit mémento énergétique de l'Union Européenne (04/ 2009)																	
3	Petit mémento des énergies renouvelables (09/ 2007)																	
2	Petit memento des déchets nucléaires (09/ 2005)																	
1	Petit memento énergétique (01/ 2003)																	
Pour recevoir une facture, cocher la case																	<input type="checkbox"/>	TOTAL =
achat en nombre: contact@global-chance.org																		(règlement par chèque à l'ordre de Global Chance)



www.global-chance.org

Pourquoi soutenir Global Chance et son projet éditorial ?

Madame, Monsieur,

Pour Global Chance et ses membres, les menaces globales qui pèsent sur l'humanité doivent être considérées non comme une fatalité et une source de ségrégation supplémentaires, mais bien comme une incitation à promouvoir la solidarité entre les peuples, l'imagination technique, politique et sociale, au service d'un développement soutenable pour tous et non pour quelques-uns.

Dans cet esprit, notre revue Les cahiers de Global Chance propose depuis 1992 à ses lecteurs :

- une expertise indépendante dans le débat sur l'énergie et l'environnement
- des analyses et des points de vue exposés dans un langage simple et accessible
- deux numéros thématiques par an, en phase avec l'actualité

Depuis 2008, un site internet est venu compléter et élargir cette démarche éditoriale.

Souscrire un abonnement, c'est soutenir notre association et son projet collectif en faveur de la transition énergétique.

Je vous en remercie par avance au nom de toute l'équipe de Global Chance et vous adresse mes chaleureuses salutations.

Benjamin Dessus, Président de Global Chance

BULLETIN D'ABONNEMENT à retourner à :

Global Chance Abonnements

12 rue du Cap-Vert - 21800 Quétigny

Tél. : 03 80 48 95 46 - Fax : 03 80 48 10 34



Je m'abonne aux cahiers de Global Chance (à partir du prochain numéro)

Pour 1 an, soit 2 numéros : Individuel 25 € Institutions et organismes : 80 €

Je règle la somme totale de € par :

Chèque bancaire joint à l'ordre de « Global Chance »

Virement sur le compte bancaire : IBAN FR76 3000 4009 1500 0070 6072 027

Carte de crédit (CB, VISA, EUROCARD) Numéro :

Expire fin :/..... Cryptogramme (trois derniers chiffres au dos de la carte) :

Je souhaite recevoir une facture

Date et signature :

Vos coordonnées postales :

RÉABONNEZ-VOUS AUSSI PAR TÉLÉPHONE AU 03 80 48 95 46 (règlement par carte bancaire)

Conformément à la loi Informatique et libertés, vous pouvez accéder aux données vous concernant et les rectifier en nous écrivant, ou vous opposer



17 ter rue du Val - 92190 Meudon
Téléphone : 33 (0)1 46 26 31 57
contact@global-chance.org
www.global-chance.org

GLOBAL CHANCE est une association de scientifiques qui s'est donné pour objectif de tirer parti de la prise de conscience des menaces qui pèsent sur l'environnement global (« global change ») pour promouvoir les chances d'un développement mondial équilibré.

La situation actuelle comporte des risques de voir se développer des comportements contraires à cet objectif :

- Comportement fataliste, privilégiant le développement de la consommation sans prendre en compte l'environnement,
- Comportement d'exclusion des pays du Sud du développement pour préserver le mode de vie occidental,
- Comportement d'intégrisme écologique, sacrifiant l'homme à la nature,
- Comportement de fuite en avant technologique porteuse de nouvelles nuisances et de nature à renforcer les rapports de domination Nord-Sud.

Mais la prise de conscience de ces menaces sur l'environnement global peut aussi fournir la chance d'impulser de nouvelles solidarités et de nouvelles actions pour un développement durable.

Pour GLOBAL CHANCE, un tel développement suppose :

- Le développement réel de l'ensemble des pays du monde dans une perspective humaniste,

- Le choix d'une méthode démocratique comme principe supérieur d'action,
- Le retour à un équilibre avec la nature, certes différent de celui que nous connaissons aujourd'hui, mais qui n'apparaisse pas comme incompatible avec le développement humain. Ce retour à l'équilibre prendra du temps. Mais après une phase transitoire d'adaptation une telle condition implique de tendre :
 - vers des prélèvements globaux mineurs et décroissants de ressources non renouvelables,
 - vers des rejets nuls ou mineurs d'éléments non recyclables (sur des durées de l'ordre de quelques générations) dans les processus de la nature.

Après discussion interne au sein de l'association, GLOBAL CHANCE se propose de mettre les compétences scientifiques de ses membres au service :

- D'une expertise publique multiple et contradictoire,
- De l'identification et de la promotion de réponses collectives nouvelles et positives aux menaces de changement global, dans les domaines scientifique et technique, économique et financier, politique et réglementaire, social et culturel, dans un esprit de solidarité Nord Sud, d'humanisme et de démocratie.