



HAL
open science

Les gestion des déchets radioactifs civils à vie longue en France

Jérémie Averous, Xavier Bravo

► **To cite this version:**

Jérémie Averous, Xavier Bravo. Les gestion des déchets radioactifs civils à vie longue en France. Sciences de l'Homme et Société. 1997. hal-01908530

HAL Id: hal-01908530

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-01908530>

Submitted on 30 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**ÉCOLE DES MINES
DE PARIS
Corps Techniques de l'État**

**BIBLIOTHÈQUE
DE L'ÉCOLE DES MINES
60, boulevard St-Michel
75272 PARIS CEDEX 06
Téléphone : 40 51 90 56**

IE 1 [360]

La gestion des déchets radioactifs civils à vie longue en France

Quelle stratégie pour quelle légitimité ?

Jérémie AVEROUS et Xavier BRAVO

26 juin 1997

BIBLIOTHÈQUE
GÉNÉRALISTE
N° 100
TOME 1
1970

Remerciements

Nous souhaitons remercier tous les industriels et acteurs du nucléaire qui ont bien voulu nous recevoir et nous aiguiller de leurs précisions et conseils, et sans qui ce mémoire n'aurait pu voir le jour.

Nous sommes tout spécialement reconnaissants à MM. CAMARCAT et RÉGENT du C.E.A., nos Guides dans le Monde de l'Atome et ses centaines de grimoires.

Maître MESSULAM, notre pilote, enfin, a su empêcher ce travail de sombrer dans la tempête à de nombreuses reprises, grâce à sa son grand Savoir du Nucléaire, doublé d'une profonde Sagesse de médiéviste sur les Légendes des Petits Peuples de la Forêt Germanique ... ; qu'il en soit ici remercié.

Sommaire

p 7	Introduction
p 8	Résumé
p 15	I. Les déchets à part d'un monde à part
p 15	A. La radioactivité et les représentations collectives
p 16	B Une industrie à risque spécifique et des déchets industriels spécifiques
p 18	C Une gestion industrielle spécifique des déchets nucléaires
p 19	II. La politique des déchets radioactifs civils de longue durée de vie en France
p 19	A. Un héritage ayant débouché sur une crise de valeurs plus que sur une crise de technologie
p 23	B. L'intervention du législateur : la loi du 30 décembre 1991 et ses suites
p 27	C. Le jeu des acteurs depuis 1991
p 33	III. Une incursion dans la prospective
p 33	A. Éléments scientifiques
p 34	A.1. le stockage géologique des déchets à vie longue
p 40	A.2. Séparation, transmutation et incinération
p 47	A.3. L'entreposage à long terme
p 48	B. Éléments économiques
p 48	B.1. La rentabilité du recyclage du Plutonium et des actinides mineurs
p 50	B.2. Le nucléaire face aux autres sources d'électricité
p 51	B.3. Les incertitudes de la prédiction des coûts du kWh
p 52	B.4. Les techniques du provisionnement
p 52	B.5. Réflexions sur le calcul économique à long terme
p 53	B.6. Le coût du stockage géologique
p 54	C. Éléments industriels
p 54	C.1. Les choix possibles de nouveaux combustibles
p 56	C.2. Les choix possibles pour le retraitement
p 57	C.3. Les choix possibles pour les "réacteurs du futur"
p 59	C.4. La possibilité d'un stockage souterrain pour les déchets à vie longue
p 62	C.5. Les rétroactions des programmes de démantèlement des armes nucléaires
p 63	C.6. Quelle synthèse envisager aujourd'hui pour ces données stratégiques ?

p 66	D. Quels peuvent être les éléments d'une éthique de la gestion des déchets à vie longue ?
p 66	D.1 Le besoin ressenti d'un Principe de Responsabilité à l'égard des générations futures
p 68	D.2 Les paradoxes de l'éthique comme outil de décision
p 69	E. La légitimation d'une décision
p 69	E.1. Les choix de société
p 70	E.2. De l'éthique des déchets à un traitement légitime de la question des déchets
p 72	Conclusion générale
p 73	ANNEXES
p 74	1- Annexe scientifique et technique
p 79	2- Calculs économiques
p 83	3- Texte de la Loi du 30/12/91 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs
p 88	4- OCDE/AEN : Opinion Collective du Comité de la Gestion des Déchets Radioactifs
p 90	5- Liste des entretiens réalisés
p 92	Bibliographie
p 95	Lexique

Introduction

Les déchets radioactifs sont une catégorie spécifique de déchets industriels toxiques, qui ont la caractéristique d'émettre des rayonnements à des niveaux dangereux pour la santé publique et l'environnement.

L'Agence pour l'Énergie Nucléaire de l'OCDE les définit comme :

"Toute matière contenant des radionucléides en concentration supérieure aux valeurs que les autorités compétentes considèrent comme admissibles dans les matériaux propres à une utilisation sans contrôle et pour laquelle aucun usage n'est prévu."

Quelques ordres de grandeur sur les volumes en jeu :

- L'industrie française produit 3000 kg/habitant.an de déchets industriels.
- Parmi ceux-ci, 100 kg/habitant.an sont classés comme toxiques.
- Parmi ceux-ci, 1 kg/habitant.an sont des déchets radioactifs conditionnés.
- Parmi ceux-ci, quelques dizaines de grammes par habitant et par an font l'objet de ce mémoire. Ce sont les déchets à activité élevée ou à vie longue. Il s'agit de déchets dont la radioactivité restera supérieure au niveaux naturels "acceptables" pendant des dizaines, voire des centaines de milliers d'années.

Le sujet des déchets nucléaires à vie longue met en confrontation beaucoup de réalités distinctes : scientifiques, industrielles, économiques, politiques sur de très longues périodes de temps.

La France a choisi, depuis 1991, de développer une approche politique originale de la question des déchets nucléaires à vie longue. Elle mêle par excellence stratégie industrielle et légitimité démocratique des choix. L'ouverture du sujet qui en a résulté a entraîné une remise à plat des stratégies possibles pour l'aval du cycle du combustible nucléaire.

Ce mémoire s'est donné pour objectif d'analyser cette approche, ses premiers résultats et d'examiner les espoirs qu'elle porte pour l'avenir.

Résumé

1. Les déchets à part d'un monde à part

La radioactivité dans notre société industrielle a un problème d'image. Ses représentations dans l'imaginaire collectif peuvent en effet confiner à la sorcellerie médiévale. L'industrie nucléaire civile s'est par ailleurs bâtie sur des origines militaires aux relents de "péché originel". Enfin, depuis le début des années 70, le nucléaire civil a souffert des mises en cause du mythe du Progrès par la technique et de la perte de confiance en l'infaillibilité des experts, sans oublier l'accident de Tchernobyl en 1986.

Mais l'industrie nucléaire est-elle vraiment si différente des autres industries dangereuses ? La grande particularité de l'industrie électronucléaire est sa grande concentration capitaliste, qui permet un meilleur contrôle, mais aussi concentre localement des risques plus grands.

Les déchets radioactifs ont-ils vraiment une spécificité technique ou industrielle ? Les déchets radioactifs représentent un volume très faible quand ils sont ramenés à l'ensemble de l'industrie; ils sont parfaitement recensés, classifiés et, pour l'essentiel d'entre eux, ils sont d'un très petit nombre de types. Ils ont une toxicité mesurable et qui décroît de façon prévisible dans le temps. Ils ne sont traitables et recyclables que dans l'industrie nucléaire. Celle-ci consacre par ailleurs beaucoup de moyens à leur gestion.

A l'opposé, dans l'industrie chimique classique, les déchets peuvent servir de matière première à d'autres industriels. La gestion des déchets classiques est rendue difficile par la multiplicité des substances concernées, l'atomicité du tissu industriel et par les contraintes du marché. Les décharges actuelles ne sont par ailleurs prévues que pour quelques dizaines d'années alors que les déchets chimiques classiques ont une durée de vie infinie.

Au-delà des réalités symboliques, la spécificité des déchets radioactifs est finalement double :

- La première spécificité est d'ordre physique : alors qu'on peut espérer réduire sensiblement la dangerosité d'un déchet classique par un confinement robuste et adapté, la dimension radioactive des déchets nucléaires oblige à prévoir des dispositifs supplémentaires pour protéger l'environnement des rayonnements et de la chaleur dégagée.

- La seconde spécificité est d'ordre temporel : le contexte industriel permet de poser le problème des déchets radioactifs avec une visibilité suffisante pour raisonner immédiatement au-delà du siècle; cela ouvre des problèmes inédits en terme d'échelle de temps.

2. La politique des déchets radioactifs de longue durée en France

Dès le début de l'industrie nucléaire civile, au milieu des années 50, les experts se sont préoccupés du problème des déchets. Après examen de diverses solutions, un consensus international s'établit sur le concept théorique d'un stockage dans une structure géologique. La notion de gestion intégrée des déchets est énoncée dès 1964. Les structures industrielles s'orientent vers des solutions de confinement et mise en stockage géologique, comme le montrent la technologie de vitrification des produits de fission mise au point en 1969 en France.

Mais le début des années 70 a été marquée par un rejet généralisé des experts par le public. Le sujet des déchets radioactifs devient le cheval de bataille des antinucléaires ; la grande presse s'en empare. La communauté scientifique développe le concept du stockage géologique mais la recherche d'une démonstration de sa sûreté à long terme induit une complexité croissante des travaux scientifiques. Jusqu'à la fin des années 80, les experts ne communiquent avec la société qu'en cherchant à l'éduquer, car ils pensent que son rejet est due à un manque de culture technique, mais ils ne parviennent pas à atténuer ce qu'ils pensent être l'irrationnel collectif. Les structures scientifiques et industrielles manquent de transparence.

Dans le même temps, un travail très important était conduit sur les déchets de faible activité. Les techniques d'entreposage à court terme des déchets à vie longue étaient par ailleurs affinées.

Mais on en aboutit pour les déchets à vie longue en 1990 aux manifestations violentes des populations contre l'implantation de laboratoires souterrains de l'ANDRA¹. Le problème des déchets radioactifs passa dans la sphère politique avec la saisie de l'OPECST² et la loi du 30 décembre 1991 qui en découla. C'était là une grande première dans le domaine du nucléaire, et qui a eu beaucoup de succès.

La loi de 91 programme quinze années volontaristes de recherche scientifique sur les déchets à vie longue, sur trois axes : la séparation transmutation, le stockage géologique et l'entreposage à long terme. Sur la base de ces travaux, conformément à la loi, le Parlement aura en 2006 à statuer sur la possibilité et les conditions d'autorisation d'un site de stockage géologique. La loi a permis de dépassionner le débat et d'instaurer un dialogue fructueux entre la société civile et les acteurs du nucléaire :

- Afin de permettre à la démarche de déboucher sur un véritable choix en 2006, la loi ouvre largement l'éventail des voies de recherche pour l'élimination des déchets.
- Une commission indépendante de suivi scientifique, la CNE³, est mise en place par la loi. Elle constitue une interface entre le Parlement et le monde de la recherche, et doit répartir équitablement l'effort fourni entre les trois axes de recherche.
- Par les garanties qu'elle pose, la loi a permis jusqu'ici d'abstraire la question des déchets des jeux politiques à très court terme (tel le syndrome NIMEY⁴).

¹ Agence Nationale des Déchets RadioActifs

² Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Techniques

³ Commission Nationale d'Evaluation

⁴ Not-In-My-Election-Year

Mais, pour les acteurs du nucléaire et du public, la loi de 91 est d'abord une démarche dont l'impact sera industriel et stratégique.

Pour bien comprendre les enjeux, il faut réaliser que le "cycle" actuel du combustible nucléaire en France s'apparente avant tout à une succession de "fragments de spirale", où l'outil industriel actuel ne représente en fait qu'une première étape très partielle dans la direction d'un modèle stabilisé de gestion du combustible en cycle fermé. Du fait des durées mises en jeu dans la gestion des combustibles, le "cycle" actuel rend de fait possibles des situations instantanément incohérentes : par exemple des combustibles usés commencent à être entreposés aujourd'hui, qui n'ont pas statut de déchet mais n'ont pas non plus aussi vocation inconditionnelle à être retraités (MOX irradiés).

L'industrie nucléaire ayant actuellement un outil très difficilement modifiable, donc une planification intangible à moyen terme, les choix actuels du secteur et les déchets actuels ("verres de fission") devraient néanmoins rester le modèle industriel de gestion du "cycle" jusqu'à l'horizon 2006.

Mais un site de stockage décidé en 2006 n'entrerait en service que vers 2020, en pleine période de renouvellement du parc et des usines de retraitement actuels. La question des déchets à vie longue se retrouverait ainsi indissolublement liée aux choix futurs de cycle.

On assiste aujourd'hui à une véritable multiplication des scénarios possibles à terme pour l'aval du cycle nucléaire, y compris un abandon pur et simple du retraitement. Aussi, les industriels sont-ils conduits à affirmer leurs positions beaucoup plus fortement que par le passé :

- EDF, contraint économiquement (par l'ouverture à la concurrence) examine les solutions proposées à l'aune du coût du kWh.
- COGEMA, qui retraite le combustible, favorise des solutions poussant à son terme logique l'embryon actuel de politique de retraitement ; elle aimerait ainsi devenir une source unique de combustible pour EDF,
- L'ANDRA a pour mission de développer un concept opérationnel de stockage pour les déchets à vie longue ; elle a choisi une approche très ouverte pour prendre en compte toute hypothèse sur l'évolution des politiques d'aval du cycle,
- Le CEA, enfin, occupe une position à part : il est un organisme de recherche dont les résultats sont partagés par tous les autres acteurs. Mais certains services du CEA sont aussi porteurs de leurs propres stratégies scientifiques,
- Les pouvoirs publics ont un rôle d'orientation stratégique et de garantie de la sûreté,
- Les associations antinucléaires cherchent à faire entendre leur voix.

3. Une incursion dans la prospective

a. Peut-on prendre des décisions raisonnables scientifiquement ?

Remettons pour cela en perspective les scénarios techniques proposés par la loi de 1991.

Le stockage géologique est l'option historique.

Le problème de sa sûreté est multidisciplinaire et demande de mettre en synergie experts des sciences de la terre (géologues) et experts de la technologie (conteneurs, barrière ouvragée), qui n'ont pas le même langage et les mêmes outils. Il pose par ailleurs des problèmes très délicats : quel est le bon critère de radiotoxicité ? quels scénarios de retour à l'homme ou d'intrusion envisager ? Néanmoins, les scientifiques sont confiants d'arriver à une démontrabilité du concept. La confiance des scientifiques est renforcée par un consensus international fondé sur les groupes d'experts, la possibilité de validations partielles des modèles par les "analogues naturels", la multiplication d'exercices inter comparaison des modèles numériques organisés par l'OCDE/AEN¹ et l'AIEA². Cependant, la réalité temporelle d'un stockage, qui est in fine un objet de l'ordre des sciences de la nature, reste l'obstacle épistémologique par excellence à une validation scientifique absolue.

La voie de la séparation-transmutation paraît, a priori, intellectuellement, plus satisfaisante que le stockage géologique, car elle semble promettre une considérable réduction de la toxicité des déchets. On ne peut cependant pas espérer se passer complètement d'un stockage géologique, à cause des rendements imparfaits des processus de séparation et d'incinération, et du volume des déchets B de moyenne activité et à vie longue. On ne peut qu'espérer diminuer la radiotoxicité des colis enfouis. Les recherches récentes montrent que les composés les plus nocifs dans un stockage sont les produits de fission mobiles ; or les recherches sur leur séparation et leur transmutation ne sont qu'embryonnaires. En fait, les recherches avaient jusqu'ici porté sur la séparation et la transmutation des actinides, s'inscrivant dans une stratégie de valorisation énergétique.

Cette voie suppose beaucoup d'efforts de recherche. Par ailleurs, une incinération efficace des produits de fission suppose des réacteurs fonctionnant en neutrons rapides avec un fort excédent de neutrons, au moins pour une bonne partie du parc électronucléaire. Cela semble plus problématique ; cependant, l'effort récent et très prononcé de Rubbia, qui tient presque de l'opération de marketing, pour son Amplificateur d'Énergie, repose sur cette possibilité. Les recherches ne sont pas encore suffisamment avancées, et ne le seront certainement pas en 2006, pour savoir si cette voie est techniquement et économiquement viable. Son principal inconvénient est sans aucun doute le surcoût associé.

Une autre option évoquée depuis peu serait d'entreposer pendant une cinquantaine d'années voire plus longtemps encore (et non de stocker) les combustibles usés aujourd'hui sans statut, dans la perspective d'un recyclage hypothétique, si le besoin devait en apparaître en terme de politique

¹Organisation de Coopération et de Développement Economique / Agence de l'Énergie Atomique

²Agence Internationale de l'Énergie Atomique

énergétique. De toute façon, en cas de stockage direct, il faut attendre quelques décennies avant de pouvoir enfouir les combustibles irradiés, pour des questions de chaleur dégagée. Il s'agirait donc d'un outil supplémentaire pour gérer l'aval du cycle mais en aucun cas d'une "solution ultime" pour des déchets à vie longue.

b. Peut-on prendre des décisions raisonnables économiquement ?

Il est déraisonnable de prétendre faire du calcul économique pertinent au-delà de l'ordre de quelques décennies. La méthode du provisionnement dans les comptes d'EDF supposait la pérennité de cette entreprise ; la création de fonds dédiés à la gestion des déchets pose le problème de la survie de ces fonds sur les marchés financiers, voire vis-à-vis de nécessités budgétaires futures d'hypothétiques gouvernements peu regardants du siècle à venir.

L'évolution de la contrainte économique dans les années à venir est par ailleurs à elle seule porteuse de très fortes incertitudes en ce qui concerne la compétitivité relative du nucléaire (prix des approvisionnements pour les différentes source d'énergie, taxe sur les émissions de CO₂ ?).

Il est nécessaire, dans les calculs à moyen et à long terme, de prendre en compte la probabilité d'apparition d'un incident et le coût associé, afin de déterminer l'espérance du coût réel, qui est ce qui est véritablement légué aux générations futures. Un système insuffisamment robuste peut alors s'avérer fort cher a posteriori. Repousser à plus tard une action n'est ainsi pas toujours la meilleure solution. Il convient également de rester conscient de ce problème lorsqu'on considère la robustesse d'un concept de stockage géologique.

c. Déchets nucléaires à vie longue et éthique

On ne peut comprendre les concepts actuels sans leur présupposé éthique : ne pas faire peser des charges indues sur les générations futures pour des bénéfices dont nous aurions seuls profité. Ce principe apparaît depuis quelques années dans des textes français ou internationaux.

Le problème est l'inscription de ce principe dans la réalité, car il faut convenir que l'éthique peut aussi être utilisée comme un outil suffisamment malléable pour ne devenir qu'une arme catégorielle de lobbying parmi d'autres.

d. La légitimation d'une décision

Il apparaît aujourd'hui, à la lumière de l'expérience de tous les pays nucléaires, que les décisions sur les stockages géologiques ne seront vécues comme légitimes par les populations que si celles-ci se sentent véritablement associées au processus de décision, si elles ont en main tous les paramètres des décideurs (évaluation du risque, etc.), et si elles peuvent s'approprier le projet au travers d'une communication suffisante et une concertation ouverte.

Les enquêtes publiques de l'ANDRA semblent aujourd'hui effectivement déboucher sur des autorisations de construction de laboratoires souterrains. Il est très difficile de prévoir la réaction du public dans l'hypothèse d'une autorisation accordée en 2006 à l'ouverture d'un stockage géologique.

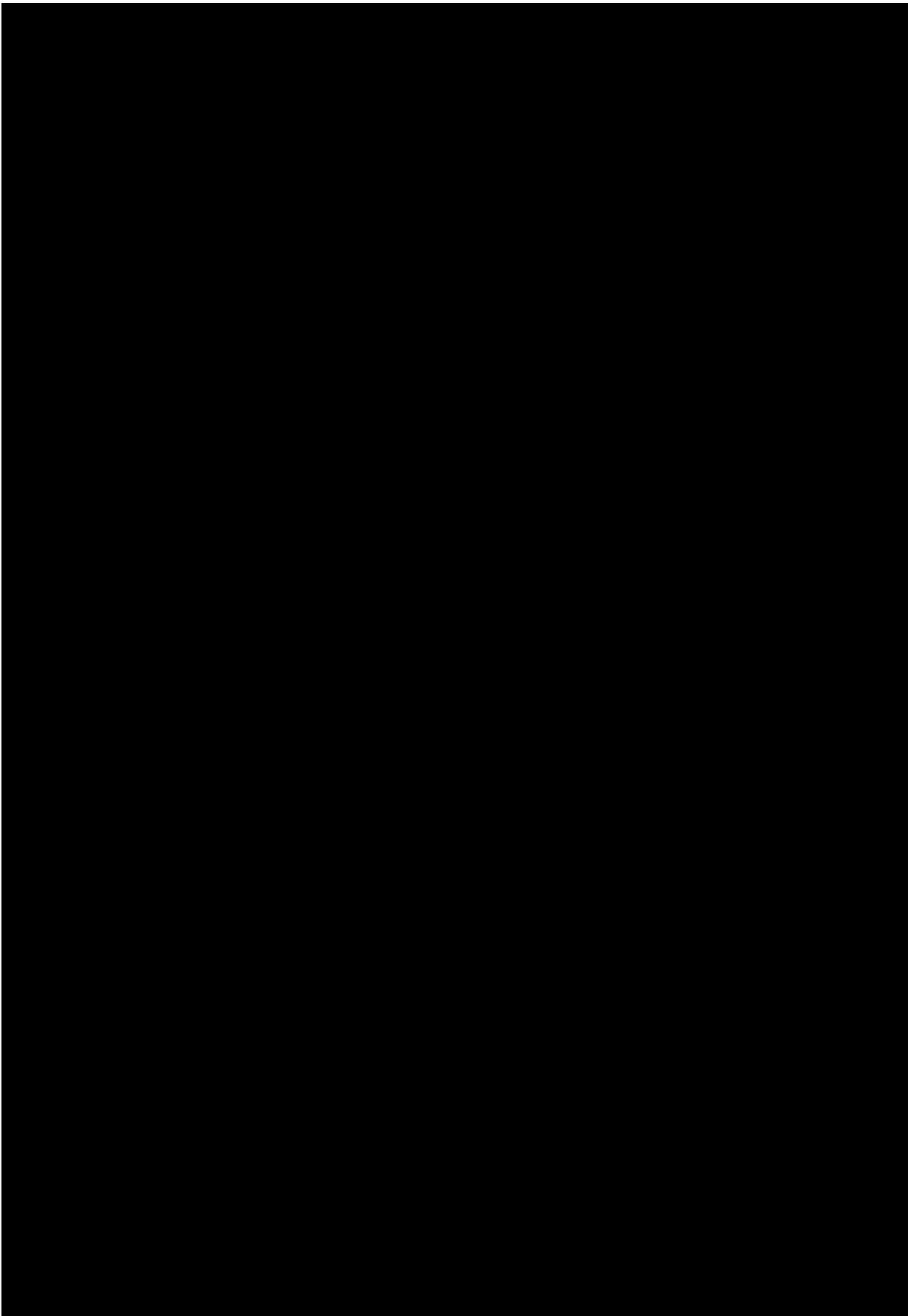
Conclusion

Compte tenu des échelles de temps mises en jeu, seule une approche graduelle est possible. Il est nécessaire d'assurer sa cohérence. L'objectif est donc de se doter au plus vite d'un savoir-faire opérationnel sur tous les outils raisonnables, tant en termes scientifiques qu'en termes de coûts.

Mais cela impose une veille permanente de tous les éléments nouveaux qui pourraient surgir et être susceptibles de remettre en cause les priorités de recherche. Cela impose aussi de vérifier qu'aucune impasse n'apparaît dans le futur comme conséquence de choix présents.

Il nous semble par ailleurs fondamental d'éviter tout risque de blocage de l'industrie nucléaire. Et, pour ce faire, il faut se donner une garantie à moyen terme en passant le cap de l'acceptation des stockages géologiques, c'est-à-dire, concrètement, en commençant effectivement à en construire un en France, des limitations techniques aux déchets à enfouir étant imposées par une loi.

Le sujet des déchets à vie longue ne peut aboutir sur le terrain que si les acteurs industriels, administratifs et politiques sont prêts à une réelle démocratisation des décisions et une transparence des informations. La création d'un site ne pourra être qu'un choix voulu collectivement par les scientifiques, les industriels, le pouvoir politique et les populations, chacun ayant apporté à la décision sa sensibilité et sa contribution propres.



I. Les déchets à part d'un monde à part :

I.A. La radioactivité et les représentations collectives :

Il serait hors de notre propos de nous livrer ici à un travail de sociologie. Il nous paraît néanmoins fondamental d'entamer ce mémoire par quelques aperçus qualitatifs d'une réalité indissociable du nucléaire : la radioactivité a, dans notre société industrielle, un problème d'image.

Les radiations agissent à distance et sont indécélables par les sens. Les populations ne savent pas nécessairement qu'elles baignent dans un flot de radioactivité naturelle qui peut varier du simple au double sur le territoire français; les connaissances épidémiologiques sur les effets réels des faibles doses de radioactivité artificielle sont encore très rudimentaires; ce que l'on connaît des effets biologiques différés et irréversibles des fortes "contaminations" a de quoi nourrir de véritables peurs. La radioactivité pourrait bien en devenir sorcellerie aux yeux de certains, et les experts au savoir technique hermétique qui la servent, d'authentiques sorciers : certains échos, rapportés par la presse en 1997, autour des sites pressentis pour des laboratoires souterrains en France (préludes à un possible stockage géologique de déchets radioactifs), font état de "chape de plomb", "résurgence des haines locales", de "menaces pour le vignoble". Un spécialiste médiéviste du 15^{ème} siècle n'hésiterait pas un instant sur l'interprétation à donner à ces réactions ...

Mais l'industrie nucléaire civile traîne aussi aux yeux de certains le "boulet" de s'être bâti sur un "péché originel", ses origines militaires avec la bombe A. C'est bien l'origine militaire qui a fourni les technologies d'enrichissement, les premiers réacteurs, les bases du retraitement, pour pouvoir produire les éléments fissiles nécessaires aux armes nucléaires. Il faut y ajouter quatre décennies vécues ensuite par le nucléaire civil aux côtés d'une voie militaire lancée dans la course aux armements et l'Équilibre de la Terreur. Il en subsiste aujourd'hui un écho dans les craintes de prolifération de la technologie nucléaire militaire vers le Tiers-Monde.

Par ailleurs, il est particulièrement difficile d'apprécier le risque industriel réel du nucléaire dans son ensemble. Il est exact que, au sein des industries dangereuses, le nucléaire est, et de plusieurs ordres de grandeur, celle dont les accidents peuvent avoir le plus grand rayon d'impact. Mais il n'y a eu que deux accidents majeurs dans le monde dans le nucléaire civil au cours des 20 dernières années, celui des réacteurs de Three Miles Island et, surtout, de Tchernobyl en 1986 : comment alors apprécier un risque industriel de "dommages quasi-illimités" en probabilité "quasi-nulle", surtout lorsque l'on est un non-spécialiste, que l'on a longtemps vécu l'héritage d'une "culture du secret" issue des origines militaires, les réalités de structures étatiques ou para étatiques peu transparentes, voire en France les erreurs de communication ravageuses des pouvoirs publics lors de l'accident de Tchernobyl ?

Enfin, depuis la fin des années 60, le nucléaire a souffert dans son image des mises en cause du mythe du Progrès par la technique dans les pays industrialisés et de la perte de confiance en l'infaillibilité des experts. A considérer les ratés de la gestion des déchets radioactifs dans la période pionnière du nucléaire ou dans l'ex-espace soviétique, d'aucuns voudraient même y trouver l'occasion de brandir un symbole de honte et d'irresponsabilité.

I.B. Une industrie à risque spécifique et des déchets industriels spécifiques

Livrons-nous ici aussi à quelques considérations qualitatives :

L'industrie nucléaire est-elle vraiment si différente des autres industries dangereuses ? L'industrie chimique a malheureusement aussi eu ses catastrophes industrielles aux conséquences dramatiques (ainsi, Bhopal). Mais il est vrai que le nucléaire est en France plus "visible" par sa grande concentration capitalistique et ses investissements en série : 56 des 58 réacteurs industriels actuellement en service sont d'une technologie REP homogène; du fait de la crise de l'énergie, les mises en service des réacteurs ont été très ramassées sur la période 1977-1990. Si l'avantage en est la possibilité d'un contrôle de la Sûreté bien mieux outillé que dans le reste de l'industrie, il faut en accepter la contrepartie : une plus grande concentration et une plus grande publicité des risques.

Les déchets radioactifs ont-ils une spécificité technique ou industrielle ?

- Les déchets radioactifs représentent un volume très faible quand ils sont ramenés à l'ensemble de l'industrie (1% des déchets industriels toxiques). Ils sont parfaitement recensés et classifiés.
- Les déchets les plus actifs sont le fait très petit nombre de producteurs (EDF, le CEA, y compris le CEA/DAM¹, la COGEMA) et sont, dans leur grande majorité, d'un très petit nombre de types.
- Ils ne sont retraitables et recyclables que dans l'industrie nucléaire. Celle-ci consacre des moyens très élevés de R&D à leur gestion.
- Ils ont une toxicité quantifiable et mesurable : on sait mesurer l'énergie associée aux rayonnements; sur la base des unités physiques de mesure de rayonnements, des unités biologiques spécifiques de "doses reçues" ont été établies; la radioprotection constitue une discipline à part entière avec une normalisation internationale (en particulier, les travaux de la CIPR²).
- La radiotoxicité des déchets nucléaires décroît de façon prévisible dans le temps jusqu'à atteindre des seuils de "banalisation".

A l'opposé, dans l'industrie classique :

- Un nombre quasi-infini de compositions pour les déchets, l'atomicité du tissu industriel, la possibilité d'utiliser certains "déchets" comme matière première dans d'autres branches industrielles, rendent impossible une approche globale.
- Les éléments chimiques ont des durées de vie quasi-infinies. De plus, il n'existe pas de critère générique pour la toxicité chimique qui serait comparable aux doses de l'industrie nucléaire.

¹Direction des Applications Militaires

²Commission Internationale de Protection Radiologique

- Les spécifications techniques pour les décharges de classe I, destinées aux déchets industriels spéciaux, ont été établies sur des bases purement empiriques; cela s'explique d'ailleurs très bien par l'extrême diversité des déchets qui y sont potentiellement stockables. Les études d'impact sur ces installations restent particulièrement rudimentaires aujourd'hui en France. Le confinement des déchets via des liants hydrauliques n'est pas satisfaisant sur le très long terme. Les décharges actuelles en France n'ont été conçues que pour quelques dizaines d'années, ce qui semble en contradiction complète avec la durée de vie des déchets : des reprises pourraient devenir nécessaires dès le siècle prochain. La situation n'est pas nécessairement comparable à l'étranger : la RFA essaie, elle, d'analyser l'impact de ses décharges sur plusieurs milliers d'années.

Par ailleurs, dans l'industrie classique, contrairement au nucléaire, la contrainte économique sur les coûts des déchets peut pousser des industriels à délocaliser leurs activités génératrices de déchets vers des pays aux critères moins stricts.

Au-delà des dimensions symboliques, la spécificité des déchets radioactifs est finalement double :

(i) La première spécificité relève de la Physique : un déchet radioactif est certes un déchet chimique mais qui a la caractéristique d'émettre des rayonnements.

Des recherches sont aujourd'hui conduites pour développer un confinement suffisamment robuste des déchets industriels spéciaux de l'industrie "classique" qui permettrait d'en envisager une "banalisation" immédiate, par exemple sous la forme de ballast ou de matériaux de revêtement de routes (ainsi, une possible application aux FURIOM¹ des techniques de vitrification).

Le cas ci-dessus présenté est extrême mais il illustre bien tout l'écart entre ce que l'on peut conceptuellement envisager pour des déchets "classiques" de l'industrie et pour les déchets radioactifs : la radioactivité oblige à prévoir des dispositifs spéciaux supplémentaires afin de protéger l'environnement des rayonnements et de la chaleur dégagée.

(ii) La deuxième spécificité est temporelle, mais sa nature est un peu inattendue : c'est finalement parce que le nucléaire comme secteur industriel est particulièrement bien structuré, parce que l'on peut traiter ses déchets comme un problème global, parce que la décroissance radioactive conduit à l'idée d'un retour des déchets "à la normale" en un temps calculable, qu'apparaît pour les déchets nucléaires la possibilité de raisonnements au-delà de l'échelle de temps du siècle. Cela ouvre des problèmes inédits, à savoir, non pas des problèmes qui n'existent pas dans le reste de l'industrie, mais des problèmes que les circonstances n'ont pas encore permis d'y poser.

De l'industrie nucléaire ou de l'industrie "classique", ce sont ainsi sans doute les industries plus classiques qui, un jour, pourraient profiter des efforts du nucléaire.

La gestion des déchets radioactifs devient ainsi le point de convergence d'échelles de temps sans commune mesure entre elles, mais qu'il convient bien de toutes prendre en compte :

¹ Fumées de Résidus d'Incineration d'Ordures Ménagères

Quelques données temporelles relatives à l'industrie nucléaire	
<i>Temps de décroissance radioactive des déchets à vie longue</i>	<i>10 000 à 1 000 000 années</i>
<i>Temps de décroissance radioactive des déchets à vie courte</i>	<i>30 à 300 ans</i>
Age de l'industrie nucléaire (civile et militaire confondues)	55 ans
Durée de vie d'un réacteur, d'une usine de retraitement etc.	40 ans
Durée de R&D nécessaire pour maîtriser un nouveau réacteur	> 15 ans
Temps nécessaire à un élément combustible pour effectuer un tour dans le cycle du combustible nucléaire	10 à 15 ans
Durée de R&D pour la mise au point d'une formule de verre	10 ans
<i>"Demi-vie" d'un élu politique, local ou national ...</i>	<i>< 5 ans</i>

I.C. Une gestion industrielle spécifique des déchets nucléaires :

Les déchets radioactifs sont classés en trois catégories selon des normes chiffrées très précises de radiotoxicité mais qui correspondent aussi à une réalité qualitative :

- L'essentiel d'entre eux sont des déchets faiblement rayonnants, à vie courte (dits "déchets A" dans l'industrie nucléaire; ils sont aujourd'hui stockés en surface, sous surveillance, pendant 300 ans).
- Une autre catégorie de déchets, plus actifs, deviendra particulièrement préoccupante lors du démantèlement des installations nucléaires actuelles : il s'agit des déchets de démantèlement ou "déchets B", qui sont a priori trop actifs pour pouvoir être stockés dans les mêmes conditions que les "déchets A". Aucune solution définitive n'a à ce jour été développée pour les déchets B.
- ***C'est le reste des déchets nucléaires (ou déchets C) qui va dans ce mémoire être considéré.***

Pour 90% d'entre eux, ces déchets C sont issus du combustible déchargé des réacteurs de recherche, des réacteurs de propulsion navale ou des réacteurs de production d'électricité. La composante essentielle provient des 1200 t/an en France de combustible irradié déchargé des coeurs des centrales EDF (soit 20 g/habitant.an sur 1 kg/habitant.an de déchets radioactifs en France).

Aucune solution définitive n'a également à ce jour été développée pour les déchets C.

Mais un demi-siècle d'histoire nucléaire a vu l'émergence d'outils opérationnels qui permettent de parfaitement les gérer aujourd'hui sur le court terme (quelques dizaines d'années) :

- En France, le combustible usé est retraité par l'usine de La Hague qui en vitrifie les éléments sans intérêt aujourd'hui. Sont ainsi produits environ 200 m³/an de verres de fission : ces verres entreposés sont, à ce jour, les seuls déchets C officiels pour l'électricité nucléaire française.
- Mais la majorité des autres pays nucléaires, entraînée par les USA, n'a pas opté pour le retraitement : les combustibles usés y sont vus directement comme des déchets, à entreposer en piscine ou placer dans des conteneurs spéciaux dans l'attente d'une solution définitive.

Néanmoins, l'industrie nucléaire, dès ses débuts s'est préoccupée de la gestion définitive des déchets à vie longue.

II. La politique des déchets radioactifs civils de longue durée de vie en France

II. A. Un héritage ayant débouché sur une crise de valeurs plus que sur une crise de technologie

Nous nous référerons dans cette partie principalement à la thèse de Jean-Claude Petit sur le stockage des déchets radioactifs (thèse de sociologie de l'innovation soutenue à l'École des Mines de Paris en 1993). Ce document expose une analyse historique et sociologique très complète du problème des déchets à vie longue, non seulement en France mais aussi dans le monde.

L'utilisation civile de l'énergie nucléaire en France date des années 1960. Les américains se lancent dans l'aventure civile dès le milieu des années 50, et donc réfléchissent plus tôt au problème des déchets. Ils conserveront de fait une position dominante sur le sujet jusqu'au milieu des années 60 et influenceront les positions françaises au travers de conférences internationales.

Jean-Claude Petit distingue deux périodes historiques aboutissant à la crise de valeurs de la fin des années 80.

L'aventure nucléaire (1940-70)

La première période est celle de l'aventure du nucléaire, des années 40 à la fin des années 60 (il faudrait sans doute y rajouter tout le début du siècle, aux pratiques discutables mais qui a cependant généré très peu de déchets relativement aux quantités aujourd'hui considérées). Cette période est caractérisée par la monopolisation du problème des déchets par les experts.

Les déchets à vie longue ont été pris en compte conceptuellement très tôt par la communauté scientifique, puisque des articles scientifiques américains en traitent dès le milieu des années 50, période à laquelle l'énergie nucléaire est ouverte à des utilisations civiles aux États-Unis. Plusieurs solutions sont discutées tout au long des années 50 et 60 comme la dilution en mer, l'envoi des déchets dans l'espace, mais le *stockage géologique* (dans des couches de sel) est déjà officiellement considéré comme le concept de référence en 1957 dans un rapport de la National Academy of Sciences. Cependant, ce concept n'est aucunement mis en pratique.

Des déchets radioactifs seront immergés en mer sous l'égide de l'OCDE/AEN¹ de 1967 jusqu'en 1981 (à partir de 1971, seule la Grande Bretagne, la Belgique, les Pays-Bas et la Suisse y participent). La France renonce à cette pratique dès 1969 et construit le Centre de Stockage de la Manche pour les déchets de faible activité à vie courte.

Les conférences internationales successives sur le nucléaire civil (1955, 1958, 1964), organisées par l'ONU, font une place de plus en plus grande au problème des déchets. En 1960, l'AIEA² organise un colloque spécialement dédié au problème. La notion de gestion globale des déchets radioactifs dans la filière nucléaire apparaît officiellement en 1964.

¹Organisation pour la Coopération et le Développement Economique / Agence de l'Energie Nucléaire

²Agence internationale de l'Energie Atomique

Le monde scientifique semble assuré de pouvoir concevoir un *stockage géologique*, même si l'on note une controverse entre les partisans de la confiance accordée à la Nature, c'est-à-dire à la barrière naturelle des couches géologiques (ce sont les géologues) et ceux de la confiance accordée à la Technologie (par la conception de conteneurs évolués et d'une *barrière ouvragée* performante). En France, la mise en route en 1969 de l'atelier pilote de vitrification des solutions de *produits de fission* à Marcoule montre que l'on pensait déjà stocker les déchets à vie longue dans une matrice facilement manipulable et résistante, dans le cadre de la logique du *stockage géologique*.

La crise (1970-90)

A la fin des années 60 (précisément 1969), la contestation des experts par le public sur le sujet de l'environnement cristallise. Elle se traduit dans le domaine particulièrement vulnérable (cf. I.A) du nucléaire par un rejet prononcé.

Le problème des déchets radioactifs sera bientôt le cheval de bataille principal des groupes antinucléaires. La grande presse s'empare du sujet, et ressuscite des solutions déjà abandonnées par les experts car très peu réalistes mais séduisantes, comme l'envoi des déchets dans l'espace. Un fossé de défiance se creuse entre les experts et le public. L'expert, mû par des considérations d'intérêt général, ne comprend pas les syndromes NIMBY du public (Not-In-My-BackYard : pas dans mon jardin) et NIMEY du politique (Not-In-My-Election-Year : pas pendant mon année électorale). Le public, lui, se plaint de la grande complexité des solutions proposées par les experts et de l'absence d'une solution dont la sûreté soit parfaitement démontrable. Il se plaint aussi du manque d'options qu'on lui propose, la seule considérée comme sérieuse étant celle du *stockage géologique*. Dans le débat général sur les relations entre la Nature et la Société, le public proteste contre le manque de transparence des démarches scientifiques dans le domaine des déchets nucléaires, par ailleurs dévalorisé par les appellations de "poubelle nucléaire" ou assimilées.

Une grande confusion s'installe donc entre experts et public. Leurs raisonnements restent asymétriques. Les experts font certes un effort de prise en compte de l'opinion publique. Mais c'est plutôt une opinion publique qu'ils s'imaginent eux-mêmes, dont l'irrationalité ne serait due qu'à une information insuffisante. Ils restent loin de la réalité sociale, et supposent plutôt un problème de communication. Les experts ne font pas un grand effort de transparence.

Une commission mise en place par le Président Carter découvre que les certitudes affichées par les experts sur le sujet sujettes à caution : "*It comes as a surprise to discover now that there seems to be an emerging consensus among earth scientists familiar with waste disposal problems that the old sense of certitude was misplaced.*"¹ - Président Carter, 1978.

Un de ses conseillers renchérit : "*faut-il avoir la foi ? [...] ces décisions ne peuvent pas aujourd'hui être prises sur la base d'un raisonnement scientifique*" - Rochlin, 1981.

¹ "C'est une surprise de découvrir aujourd'hui qu'un consensus émerge parmi des spécialistes de l'enfouissement des déchets qui tend à montrer que l'ancien sentiment de certitude était sans doute peu fondé."

C'est là sans doute la découverte par la société civile qu'il est impossible de prédire avec certitude le comportement d'une structure à si long terme (cf. III.A.1). Cela résulte peut-être d'un problème de compréhension mutuelle entre le langage parlé par l'expert et celui du public.

Comparaisons internationales

Pendant les années 70 et 80, suite à la crise de l'énergie, la France se dote d'un puissant parc électronucléaire à base de *réacteurs à eau légère pressurisée* (REP). Il doit être, dans les projets initiaux, complété par un parc de *surgénérateurs à neutrons rapides*, qui ne sera pas construit à la suite de problèmes techniques sur Superphénix et de la moindre priorité assignée à une politique d'indépendance énergétique à partir du milieu des années 80 (les *surgénérateurs* de type Superphénix étaient supposés permettre de se passer de l'approvisionnement en Uranium fissile en créant plus de Plutonium qu'il n'en consommaient). L'usine de *retraitement* du combustible irradié de la Hague entre en opérations en 1989 pour sa partie civile.

Comme dans tous les pays dotés de l'arme nucléaire, le public tend à ressentir une certaine ambivalence entre nucléaire civil et militaire (l'usine UP2-400 de la Hague est militaire alors que son successeur UP2-800 est civile).

Du point de vue des déchets nucléaires à vie longue, l'ANDRA, service du CEA créé en 1979, participe aux coopérations internationales et privilégie le concept du *stockage géologique*. Cela amènera l'ANDRA à se lancer dans des études préliminaires de caractérisation géologique puis à proposer l'ouverture de *laboratoires souterrains* à la fin des années 80.

La Suède est un pays en avance sur le sujet des déchets à vie longue, car une loi conditionne en 1977 le développement de la production électronucléaire à la démonstration par les exploitants de leur capacité à gérer leurs déchets. Les Suédois seront donc conduits dès la fin des années 70 à lancer un vaste programme de recherche, en coopération internationale, incluant un *laboratoire souterrain* (ouvert à la condition qu'il n'y aura pas de *stockage géologique* en ce lieu). La Suède envisage un *stockage direct* des combustibles usés car elle ne possède pas de capacité de retraitement et elle désire arrêter la production d'électricité électronucléaire à moyen terme, suite à un référendum. L'exemple de la Suède comparé à celui de la France illustre nettement les différences existant entre des pays dotés de l'arme nucléaire et ceux qui ne l'ont pas. En effet, la construction de bombes A au Plutonium, ou de bombes H, nécessite l'acquisition d'une technologie de *retraitement* avancée (pour extraire le Plutonium des combustibles irradiés dans les réacteurs militaires) et de grandes connaissances sur la manipulation et la chimie du Plutonium. Ainsi, en France, la technologie de retraitement du combustible est issue des efforts consentis dans le domaine militaire. Il n'est pas évident que les coûts d'acquisition de cette technologie ne soient pas trop élevés pour justifier un développement à titre civil uniquement.

Aux États-Unis, le Président Carter lance à son arrivée un grande réflexion sur le cycle du combustible nucléaire. La loi sur la non-prolifération (*Nuclear Non-Proliferation Act*) votée en 1978 interdira le retraitement du combustible civil. Ne reste donc que la possibilité du *stockage direct*. C'est un choix politique lié à des considérations de sécurité nationale ; à leurs yeux, le *stockage direct* a l'avantage de protéger le Plutonium des combustibles irradiés -potentiellement utilisable

pour fabriquer une bombe- derrière une barrière de radiations impénétrable. Les États-Unis espèrent servir de modèle et que les autres pays les suivront dans la voie du *stockage direct*, ce qui ne sera pas le cas. Le site de Yucca Mountain, dans le Nevada, est choisi à la fin des années 80. L'installation d'un *stockage géologique* sur ce site sera vivement combattu par les autorités de l'État du Nevada et de nombreuses associations qui portent plainte, retardant considérablement les travaux. Ces retards et les nombreux contentieux ont déjà coûté 10 milliards de francs au contribuable américain, alors que les travaux de percement ont à peine commencé sur le site, avec un retard tel qu'il remet en cause l'ensemble de la filière nucléaire américaine.

L'Allemagne, confrontée à une opinion publique extrêmement antinucléaire, hésite entre *retraitement* et *stockage direct*. La Belgique, la Suisse et le Japon ont une politique comparable à celle de la France - ce sont d'ailleurs les pays qui ont un problème d'indépendance énergétique comparable. La Suisse et la Belgique se dotent de *laboratoires souterrains*.

La rupture de la fin des années 80

A la fin des années 1980, l'incompréhension entre les experts et le public atteint son paroxysme. Aux États-Unis, l'État du Nevada déclare illégal en 1989 le *stockage géologique* de matières radioactives sur son territoire (l'État du Nevada est l'un des seuls États américains à ne posséder aucune installation nucléaire civile). La Cour Suprême des États-Unis a finalement cassé cette loi après quelques années de procédure.

En Allemagne, l'opposition de l'opinion publique fait abandonner en 1989 la construction de l'usine de retraitement de Wackersdorf, alors qu'elle est quasiment prête à fonctionner. Cet abandon aura coûté au contribuable allemand la somme de 9 milliards de francs.

A la même époque, la population redoute en France l'ouverture forcée d'un *laboratoire souterrain*, soupçonné d'être l'alibi d'un site de *stockage géologique*. De très graves incidents (manifestations extrêmement violentes, situation presque insurrectionnelle) autour des sites proposés par l'ANDRA pendant l'hiver 89-90 ont conduit le Premier Ministre à déclarer un moratoire et à saisir l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Techniques (OPECST) et le Collège de Prévention des Risques Technologiques. Ce processus a débouché sur la loi du 30 décembre 1991, aboutissement d'un changement de méthode radical.

Ce phénomène de rupture généralisé peut être considéré comme l'aboutissement de la crise développée depuis le début des années 70. L'accident de Tchernobyl (1986) aura peut-être joué le rôle de facteur déclenchant, de par l'évocation répétée dans les médias des problèmes de contamination radioactive de l'environnement et de ses effets sur la santé.

Paradoxalement, la confiance des experts en la validité du concept du *stockage géologique* s'accroît au cours de la période, bien que l'on considère universellement que le problème nécessite encore bien des études. Mais le concept général est désormais précisé, sous forme d'ingénierie préliminaire, d'études de sites grossières, et du retour d'expérience des premiers *laboratoires souterrains* méthodologiques (ouverts à la condition qu'il n'y aura jamais de stockage souterrain sur ce site) en Suède ou en Suisse.

II.B. L'intervention du législateur : la loi du 30 décembre 1991 et ses suites

Préparation de la loi

Suite au moratoire décidé par le Premier Ministre, l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Techniques (OPECST) est saisi en 1990 par le Gouvernement. Il charge le député Christian Bataille d'un rapport sur le sujet des *laboratoires souterrains* et plus généralement sur la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue.

M. Bataille rencontre alors pendant un an les différents acteurs, industriels, chercheurs, collectivités locales, associations. Son rapport final préconise une relance forte des travaux sur les procédés de transmutation et de retraitement poussé (trop "en sommeil" en France), et une poursuite active des recherches sur les *stockages géologiques*. M. Bataille aura pu observer le sentiment largement répandu dans la société civile d'une "culture du secret" imprégnant le milieu du nucléaire¹ ; il souhaite permettre l'introduction de l'ouverture et de la transparence dans les recherches sur les déchets.

Ce rapport débouche alors sur la rédaction d'un projet de loi "relatif aux recherches sur l'élimination des déchets radioactifs" qui sera discuté par les députés et les sénateurs à partir de la mi-91. La loi "relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs" (noter le subtil changement de titre) sera finalement adoptée à la quasi-unanimité par l'Assemblée Nationale le 30 décembre 1991.

La lecture des débats de l'Assemblée et du Sénat montre une discussion longue et constructive. Les députés et les sénateurs y constatent avec satisfaction que, pour une fois, le pouvoir législatif n'a pas simplement entériné un projet de loi gouvernemental : le texte a été beaucoup amendé par les parlementaires, même si l'on dit aujourd'hui que beaucoup de ces amendements ont été "téléguidés". Certains élus affirment lors du débat que le gouvernement se cache derrière le parlement pour prendre des décisions qui lui incomberaient en fait ; cette version est fermement démentie par les représentants du gouvernement. Le ministre de l'Environnement de l'époque souligne au cours de sa présentation du texte que la procédure législative certes n'était pas obligatoire mais que cette question "nécessite l'intervention active de la représentation nationale et la solennité d'une loi".

Cette loi reste aujourd'hui encore le seul texte législatif sur le nucléaire en France. Pendant le débat, certains élus appelleront de leurs vœux l'écriture d'une loi portant sur l'ensemble du programme nucléaire ; cette éventualité sera repoussée par Christian Bataille et le gouvernement. Beaucoup se demandent d'ailleurs si une telle loi sur le nucléaire dans son ensemble parviendrait à dépasser le stade des vagues généralités aux effets peu contrôlables. Selon M. Bataille, par exemple, il vaudrait mieux procéder par des lois successives portant sur des aspects précis de l'industrie nucléaire².

¹ Rapport de l'OPEST, 1990

² Entretien, avril 97

La loi “relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs”

La loi commence à l'article 1 par une déclaration générale selon laquelle “la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue doit être assurée dans le respect de la protection de la nature, de l'environnement et de la santé, en prenant en considération les droits des générations futures”. Cette déclaration résulte d'un amendement de l'Assemblée, qui a ainsi voulu fournir une base éthique préliminaire. La présence d'un tel préambule dans une loi est un événement très rare.

L'article 2 définit ensuite les conditions de *stockage géologique* de produits dangereux (même non radioactifs), stipulant que des autorisations à durée illimitée ne pourront être données que par une loi. Cet article a été introduit à cause du souci des élus de ne pas entériner par cette loi le choix définitif de la solution du *stockage géologique*. En effet, la version initiale du projet de loi ne leur donnait apparemment pas assez de garanties ; ils avaient l'impression de ne devoir servir que de chambre d'enregistrement de choix antérieurs effectués par le gouvernement et les administrations. L'article 3 a été également introduit par le parlement. Il interdit “le stockage en France des déchets radioactifs importés [...] au-delà des délais techniques imposés par le retraitement”. Cet article répond au souci contingent des parlementaires lié à la mise en service des installations de La Hague.

L'article 4 donne les grandes orientations de la recherche sur le sujet des déchets radioactifs, en demandant au gouvernement de remettre chaque année un rapport sur l'état d'avancement des programmes. La loi donne trois axes de recherche, auxquels il est fait constamment référence aujourd'hui dans toute stratégie de recherche sur les déchets radioactifs. Ces trois axes sont :

“- la recherche de solutions permettant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans ces déchets ;
- l'étude des possibilités de stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains ;
- l'étude de procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface de ces déchets.”

Il nous faut noter dans le second axe la notion de *stockage géologique réversible*, qui a été introduit par les parlementaires. Ce concept de réversibilité, aujourd'hui au coeur des études d'ingénierie du stockage, est apparu officiellement dans cette loi. Il est basé sur des considérations éthiques.

L'article 4 donne ensuite une limite de quinze ans pour que le gouvernement remette au Parlement “un rapport global d'évaluation de ces recherches accompagné d'un projet de loi autorisant, le cas échéant, la création d'un centre de stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue et fixant le régime des servitudes et des sujétions afférentes à ce centre”. Il est donc prévu que cette décision éventuelle sera assortie de conditions sur le type et le nombre de colis de déchets que l'on pourra y descendre. Ces conditions permettront aux décideurs de 2006 de moduler la décision de *stockage géologique* en autorisant par exemple précisément les quantités de chaque radionucléide que l'on pourra y enfouir.

Bien qu'il apparaisse raisonnable de fixer une limite dans le temps à ces recherches, on peut se demander pourquoi avoir choisi une période de quinze ans. Ce délai nous amène en 2006, date qui a le bon goût de correspondre justement aux grands choix de renouvellement de la filière électronucléaire française. Dans le débat parlementaire, des amendements divers ont proposés d'autres délais (vingt ans, etc.) mais ont été repoussés. Interrogé à ce sujet, M. Bataille nous a répondu¹ que le délai de quinze ans avait été choisi car il n'était pas trop éloigné et qu'il correspondait à l'échéancier proposé pour les recherches dans les *laboratoires souterrains*. De fait, nous savons aujourd'hui que ce calendrier est extrêmement tendu, et qu'il sera difficile de disposer en 2006 de tous les éléments permettant de prendre une décision de *stockage géologique*.

La fin de l'article 4 crée une Commission Nationale d'Évaluation de la recherche sur les déchets radioactifs (CNE). Cette partie a été ajoutée par les parlementaires, soucieux d'une évaluation régulière et indépendante de la recherche. Cette commission doit produire le rapport annuel sur l'avancement des recherches et donner les directions prioritaires. De nombreux amendements ont été déposés lors du débat parlementaire sur la composition de cette commission, afin d'en assurer l'indépendance la plus grande possible. Les parlementaires ont souligné l'importance d'y inclure des experts étrangers. Finalement, le texte final retient six experts (dont deux étrangers) nommés par l'Assemblée et le Sénat sur proposition de l'OPECST, deux nommés par le gouvernement sur proposition du Conseil Supérieur de la Sûreté et de l'Information Nucléaire (CSSIN), et quatre nommés par le gouvernement sur proposition de l'Académie des Sciences. De fait, la composition actuelle de la commission est largement multidisciplinaire et ses participants proviennent d'institutions très diverses.

Les articles 5 à 12 fixent les modalités de création des *laboratoires souterrains*. C'était là le but initial de la loi, qui cherchait à débloquer la situation après les événements graves de février 1990. Ces articles cherchent à garantir les droits des collectivités locales concernées, en déterminant précisément les procédures administratives à suivre pour ouvrir et exploiter un tel laboratoire. La loi garantit qu'aucun entreposage ou stockage de déchets radioactifs n'aura lieu dans les laboratoires. Par ailleurs, la loi affirme la nécessité de mesures d'accompagnement pour les collectivités locales concernées. Ce texte permet d'apporter des garanties fortes aux populations et d'institutionnaliser la concertation et le dialogue.

L'article 13 change le statut de l'ANDRA, qui de service du CEA devient un Établissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC) placé sous la tutelle des ministres chargés de l'industrie, de la recherche et de l'environnement et doté d'un conseil scientifique indépendant. Cet article résulte d'un amendement de l'Assemblée Nationale, extrêmement soucieuse de garantir l'indépendance de cet organisme comme le montrent ses débats, tout en mettant en place des passerelles pour permettre des échanges aisés de personnel avec le CEA et les exploitants. Cet article de la loi peut-être considéré comme la lettre de mission de l'ANDRA, car il définit ses responsabilités, tant au niveau de la recherche et développement sur les stockages géologiques, de

¹ Entretien, avril 97

la définition de spécifications pour les colis de déchets, que du recensement des déchets radioactifs en France.

L'article 14, finalement, crée un "Comité Local d'Information et de Suivi" sur les sites des *laboratoires souterrains*. Cet article résulte également d'un amendement de l'Assemblée, soucieuse d'offrir la transparence maximale aux recherches sur les déchets.

Suites de l'intervention parlementaire

Cette loi aura permis, comme souhaité, de calmer les esprits et de "réintroduire la rationalité et la clarté là où passions et calculs ne sauraient prévaloir" (C. Bataille, débat parlementaire). Le paragraphe II.C. étudie les conséquences sur les institutions de cette loi. Une constatation générale est que l'objectif d'introduire de la transparence dans la recherche sur les déchets radioactifs est atteint, comme en témoignent la plupart des acteurs que nous avons rencontrés. La "culture du secret" n'a pas résisté à l'intervention parlementaire.

Le gouvernement a chargé dès 1992 le député C. Bataille d'une mission de médiation afin de déterminer des sites pour l'implantation d'un laboratoire souterrain. Fait notable car rare, il sera reconduit dans cette mission par un nouveau gouvernement de tendance politique différente en 93. Sans doute est-ce à cause de la connaissance du dossier accumulée par M. Bataille depuis le début de son engagement dans le domaine des déchets radioactifs. Il est également possible qu'il soit difficile de trouver un homme politique qui veuille s'impliquer publiquement et fortement dans un tel dossier.

La mission de médiation tente de trouver des collectivités locales volontaires pour un laboratoire souterrain. Elle inverse en cela la démarche utilisée avant 1990 : elle cherche d'abord des populations favorables avant de vérifier que le site convient géologiquement. La motivation principale des collectivités demandant à être informées sont les possibilités de désenclavement et d'aménagement du territoire offertes par le laboratoire et les mesures compensatoires prévues par la loi. Les élus locaux s'informent précisément sur les garanties offertes par la loi de 91.

La mission de médiation fait également beaucoup d'efforts pour informer l'opinion publique ; elle remet pour cela beaucoup d'informations et de matière aux médias nationaux et régionaux. Elle rencontre sur place élus locaux, associations, syndicats, et toute personnalité en faisant la demande. Cette mission de médiation aura eu une réussite extraordinaire. L'ANDRA parle même de miracle¹, car la consultation des collectivités locales pour l'ouverture des *laboratoires souterrains* donne aujourd'hui des résultats extrêmement positifs. On constate aussi que ce thème n'aura pas été porteur de débat dans la campagne électorale des législatives de 97, les députés se présentant contre ces laboratoires ne recueillant pas l'assentiment populaire.

Généralement, la principale opposition au projet de laboratoire souterrain vient des professions agricoles qui craignent de voir ternir une image d'appellation d'origine contrôlée. Cela est vrai en

¹ Entretien avec M. Kaluzny, juin 97

particulier des viticulteurs du canton de Bagnols-sur-Cèze, dont les vignobles sont pourtant situés aux portes du centre de recherche nucléaire de Marcoule.

La médiation aura cependant permis de déterminer certains points chers aux populations et à leurs élus. C'est ainsi que la réversibilité d'un éventuel stockage ressort comme une condition nécessaire à son approbation. Les compensations financières commenceront, selon les souhaits des élus locaux, à être versées dès le début de la construction des laboratoires. Les populations et les collectivités locales se montrent également fort attachées à ce qu'elles soient informées régulièrement, et à ce qu'un débat local soit organisé à nouveau si l'on décide en 2006 d'un stockage.

II.C. Le jeu des acteurs depuis 1991 :

Mais, pour les acteurs du nucléaire, la loi de 91 est d'abord une démarche dont l'impact sera industriel et stratégique.

Pour bien comprendre les enjeux, il faut d'abord s'arrêter un instant sur ce qu'est aujourd'hui en France le "cycle du combustible nucléaire".

La France a opté pour un scénario de recyclage de l'Uranium fissile "résiduel" et du Plutonium (formé par transmutation), contenus dans les combustibles UOX usés (les combustibles standards de ses réacteurs à eau sous pression); les "résidus" (autres *actinides*, dits *actinides mineurs*, et *produits de fission* (cf Annexe 1)) étant vitrifiés et entreposés, en l'attente d'un stockage définitif.

Les activités civiles de l'usine de retraitement de la Hague ont ainsi été considérablement développées depuis 1981 : pour les combustibles français, depuis 1994, les chaînes d'UP2-800 sont rentrées en service, fortement modernisées, avec une capacité de retraitement de 800 tMLI/an¹ (pour environ 1200 tMLI/an de combustibles irradiés déchargés des réacteurs EDF aujourd'hui).

L'Uranium de retraitement constitue un problème de déchets faiblement actifs qui sort donc du cadre de ce mémoire (pour information, l'Uranium de retraitement a une composition en isotopes pairs, poisons pour les réacteurs, dégradée par rapport à l'Uranium naturel. Il est envisagé à ce jour d'en limiter le flux de recyclage à seulement deux recharges de réacteurs par an et il n'est pas prévu de retraiter ensuite ces recharges. Le flux correspondant n'est donc pas bouclé dans les plans actuels, le problème du sort ultime de cet élément étant différé pour des raisons économiques).

Dans la politique de retraitement actuelle, l'élément intervenant dans la problématique des déchets à vie longue est le Plutonium, émetteur alpha de *temps de demi-vie* 24 000 ans. Les plans énergétiques initiaux, décidés au moment de la crise de l'énergie dans les années 70, prévoyaient d'utiliser le Plutonium de retraitement comme le combustible d'amorçage d'une filière à neutrons rapides qui aurait compté une dizaine de surgénérateurs sur le modèle de Superphénix. L'échec industriel de Superphénix dans les années 80, le contre-choc pétrolier de 1986, ont poussé le

¹tonne de métal lourd irradié = unité de masse des combustibles usés déchargés

développement d'une voie alternative de recyclage : la fabrication de combustibles MOX, à support d'Uranium naturel enrichi en Plutonium, utilisés dans les réacteurs "classiques" du parc actuel (les REP).

Les premiers MOX ont été chargés en 1987. 28 réacteurs sur le parc sont, de par leur conception d'origine, capables de recevoir des tiers de coeur en MOX; le projet est de tous les charger à terme en MOX; 16 en ont déjà reçu l'autorisation à ce jour. En 1997, à Marcoule, l'usine (Mélox) de fabrication à l'échelle industrielle des MOX effectue sa montée en puissance à 100 t de combustible par an. Les démarches ont été engagées pour porter à terme sa capacité à 160 t/an. Par ailleurs, en 1993, le test a été réalisé avec succès à La Hague de retraiter quelques tonnes de combustibles MOX usés, qui, pour la circonstance, étaient mélangés dans le procédé avec les combustibles UOX standards.

Mais pour l'instant, aucune décision n'a été prise quant au retraitement ou non des MOX usés; plusieurs éléments peuvent contribuer à expliquer cette situation :

- un cycle de retraitement des UOX prend aujourd'hui 12 ans,
- les MOX usés ont une composition isotopique énergétiquement dégradée par rapport aux UOX usés (cf III.A.2),
- les premiers MOX usés remontent à 1990 seulement,
- les MOX usés ont un besoin de décroissance thermique avec le temps très supérieur à celui des UOX usés, ce qui peut rendre pertinent d'en différer le retraitement.

Le schémas ci-joint, issu du "Monde" du 17 Avril 1997, fournit involontairement un très bon support à ces considérations. Notons en particulier que :

- Il subsiste implicitement une inconnue dans l'aval du cycle : au moins pour les "déchets officiels" déjà produits, à savoir les verres de fission, un stockage doit être envisagé. Mais l'outil de stockage, quoiqu'évoqué sur le schémas, n'est pas construit à ce jour.
- Les flux envisagés dans le cycle et les décisions prises à ce jour sont mécaniquement en train de créer une catégorie inclassable d'éléments qui gonfle régulièrement chaque année : "l'entreposage de combustibles usés", qui touche les MOX, les UOX à base d'Uranium de retraitement, ou le surplus d'UOX par rapport aux capacités de retraitement de La Hague. La question est de savoir si ces éléments ont vocation à être retraités après un décalage de quelques années (décennies (?)), ou à partir à terme, en l'état, au stockage direct, sur le modèle des cycles ouverts envisagés par les pays nucléaires sans retraitement. Selon la Délégation aux Combustibles d'EDF, 350 tMLI/an pourraient ainsi se retrouver dans cette situation hybride.

Quelle est la stabilité en temps de cette présentation ?

Les dates des choix ici évoqués et l'outil industriel de retraitement correspondant remontent certes à moins d'une dizaine d'années. Mais l'industrie nucléaire ayant un outil très difficilement modifiable et une planification parfaitement cohérente sur le moyen terme, il s'agit là d'une orientation lourde :



les choix actuels du secteur et les déchets actuels, les verres de fission, devraient rester le modèle industriel de gestion du cycle jusqu'à l'horizon 2006 : les industriels n'envisagent en fait à ce jour comme modification sur le cycle qu'une poursuite de la montée par palier des *taux de combustion* des MOX et UOX en réacteur.

Mais l'avenir ultérieur est autrement plus ouvert : un site de stockage décidé en 2006 n'entrerait en service que vers 2020, en pleine période de renouvellement du parc et des usines de retraitement actuels (cf III.C.). Or, comme on vient de le voir, le "cycle" français actuel tient avant tout d'une succession de "fragments de spirale du combustible", pour lesquels l'outil industriel s'apparente à une ébauche encore très incomplète de politique de recyclage, et dont rien ne prouve finalement qu'elle ait vocation à tendre naturellement vers un modèle de gestion du combustible selon un cycle fermé en équilibre. Compte tenu de la situation actuelle d'entreposage et des échelles de temps industrielles, la question des déchets à vie longue serait ainsi indissolublement liée aux choix futurs de cycle et ces derniers seraient pour partie la conséquence directe de problèmes survenus dès aujourd'hui.

Les acteurs du secteur ont très rapidement réalisé cet état de fait dans la foulée de la relance des recherches sur l'aval du cycle consécutives à la Loi de 91. Aussi voit-on aujourd'hui chacun affirmer publiquement ses positions plus fortement que par le passé :

- EdF, en producteur d'électricité devant se préparer à la dérégulation énergétique européenne, se montre particulièrement attentif aux conséquences des choix de cycle possibles sur le coût du kWhé nucléaire; il existe un certain attentisme mais avec une volonté de favoriser pragmatiquement les solutions les plus simples (et incidemment) les moins onéreuses possibles (les scénarios d'EdF n'excluent officiellement plus aujourd'hui un recours au stockage direct de combustibles irradiés).
- La COGÉMA, qui retire le combustible et produit les MOX, favorise naturellement toute solution qui pousserait à son terme logique l'embryon actuel de politique de retraitement, et déboucherait ainsi sur un véritable cycle à plusieurs tours, voire en équilibre.
- L'ANDRA, l'Agence Nationale des Déchets Radioactifs, a la responsabilité des sites de stockage déjà existants pour les déchets de faible activité. Pour les déchets à vie longue, elle est pilote pour le deuxième axe de la Loi de 91 (recherches sur le stockage souterrain). Elle a pour mission de développer un concept opérationnel de stockage pour les déchets à vie longue, et cherche à avoir la stratégie la plus ouverte possible : possibilité d'accueillir des colis de verres de fission comme des colis de combustibles irradiés en stockage direct.
- Le CEA, enfin, occupe une position à part : il est l'Organisme de recherche du nucléaire auquel se réfèrent les autres acteurs industriels : la COGÉMA et l'ANDRA sont d'anciens services du CEA qui en ont été détachés au fil des années.

Le CEA est pilote sur les Axes 1 et 3 de la Loi de 91 (Séparation-Transmutation / définition des colis et entreposages longue durée). Le CEA a connu depuis 91 un renforcement considérable des moyens de recherche affectés à toutes les voies de l'aval du cycle avec a minima dans chaque voie la mise en place d'équipes de réflexion méthodologique pour préparer des programmes de R&D à caractère opérationnel.

Trois branches du CEA travaillent spécifiquement sur la question des déchets :

(i) la DCC, Direction du Cycle du Combustible, suit les dossiers de séparation et de tenue des colis de déchets;

(ii) la DRN, Direction des Réacteurs Nucléaires, s'occupe du développement de nouveaux combustibles et réacteurs, et travaille sur la transmutation;

(iii) l'IPSN, Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire suit les aspects de Sûreté et sert d'appui technique à la Direction de la Sûreté des Installations nucléaires (cf ci-dessous).

Les résultats du CEA sont partagés par tous les autres acteurs. Mais certains services du CEA peuvent être porteurs de leurs propres stratégies de recherche.

En parallèle des grands acteurs de l'industrie nucléaire, l'administration et le pouvoir politique se sont organisés pour pouvoir suivre l'évolution de la question des déchets et préparer ainsi les choix stratégiques . Les acteurs impliqués sont :

- La Commission Nationale d'Évaluation (CNE) : elle est issue de la Loi de 91 (cf II.B), et chargée de contrôler l'avancement des recherches scientifiques réalisées dans le cadre de la Loi;

- L'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques : il suit pour le compte du Parlement les travaux de la CNE et réalise des rapports d'étapes.

- En 1997, suite au rapport d'étape de 1996 du député C.Bataille à l'OPECST, les Ministères de l'Industrie (via la DGEMP¹, avec une sensibilité stratégie énergétique) et de l'Environnement (via la DPPR², avec une sensibilité développement durable) se sont vus confier la préparation d'un rapport sur l'avenir du cycle du combustible examinant les stratégies industrielles possibles.

Face à ce rapport, et compte tenu de l'enjeu, les quatre acteurs de l'industrie nucléaire ont alors décidé de constituer temporairement un Groupe de Travail des Industriels sur l'aval du cycle, afin d'élaborer un document stratégique écrit en commun à soumettre à l'administration.

- Le Ministère de la Recherche (via la DGRT³), assurant la tutelle scientifique du CEA, a développé un suivi spécifique de la stratégie des recherches;

¹Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières

²Direction de la Prévention des Pollutions et Risques

³Direction Générale de la Recherche et de la Technologie

- La DSIN¹, enfin, veille aux questions de sûreté sur l'ensemble du cycle (équipements, réacteurs, combustibles etc.). Sa première sous-direction aura ainsi à analyser en temps voulu les concepts de stockage qui lui seront proposés par l'ANDRA.

Afin de poser de jalons préparatoires, elle a émis en 1991 un document d'orientation générale, la RFS III-2-f², qui pose, au mieux de l'état de l'art, les objectifs généraux de sûreté à retenir a priori pour la définition d'un site de stockage.

En termes de sûreté, il lui paraît fondamental de voir émerger au plus vite des solutions robustes et opérationnelles; aussi se méfie-t-elle d'un risque de dérives des programmes de recherche vers des travaux purement théoriques, capables de se poursuivre sans résultat concret des décennies durant.

Des institutions internationales, comme l'Agence pour l'Énergie Nucléaire de l'OCDE, suivent par ailleurs attentivement l'évolution de la question des déchets à vie longue dans le monde; elles essaient de promouvoir la circulation d'informations entre pays, d'organiser des groupes de travail transnationaux et de réaliser des expertises internationales.

A la marge des acteurs institutionnels, un autre ensemble d'acteurs est lui aussi particulièrement intéressé par le sujet : les associations antinucléaires. Mais celles-ci constituent en fait une nébuleuse éclatée avec des positions très diversifiées. Passons en revue quelques positions :

(i) Des structures internationales, comme Greenpeace, se livrent à une diabolisation sans appel du nucléaire. Dans cette optique, les déchets ne sont plus pour elles un élément de réflexion mais un élément tactique fondamental : ils sont la composante du cycle qui pourrait faire tomber la filière nucléaire par "constipation": d'où une stratégie de blocage de la construction des sites de stockage géologique, des extensions des capacités d'entreposage etc.; quant aux déchets déjà produits, la réflexion en reste sommairement à l'idée qu'il faudrait ad vitam aeternam les laisser entreposés sous surveillance sur le site des centrales (qui auraient été arrêtées, bien sûr).

(ii) Une association française comme Robin des Bois ne veut pas voir le nucléaire trouver dans les déchets à vie longue un argument de plus pour la pérennisation d'une électricité française à 80% nucléaire. Mais c'est l'occasion pour elle de développer une approche originale :

Robin des Bois insère le problème des déchets à vie longue dans ses préoccupations beaucoup plus générales d'une gestion correcte des déchets industriels. Il s'agit pour elle que s'éternise le moins longtemps possible l'héritage de chaque activité industrielle en termes de déchets. Dans le nucléaire, elle souhaite ainsi, si la démontrabilité du stockage peut être acquise, voir se bâtir au plus vite un site et est parfaitement en faveur des laboratoires souterrains. Elle a beaucoup apprécié le changement d'état d'esprit induit par la Loi de 91.

(iii) La CRIIRAD³, autre association française née avec Tchernobyl, se veut un groupement indépendant de scientifiques, avec ses propres moyens de mesure de la radioactivité, capable de bâtir de véritables dossiers de contre-expertise face aux industriels et aux pouvoirs publics.

¹Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires

²Règle Fondamentale de Sûreté

³Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radioactivité

III. Une incursion dans la prospective :

1997-2030 : Quelles décisions possibles pour les déchets à vie longue ?

Les échelles de temps du nucléaire industriel vont entraîner un étalement des choix stratégiques pour les déchets à vie longue sur plusieurs décennies.

L'espace des choix possibles sera celui qui aura été déterminé par les avancées scientifiques et techniques.

La deuxième partie a insisté sur la volonté, qui a, en France, présidé depuis quelques années, d'ouvrir au maximum les pistes à explorer.

La deuxième partie a également souligné les intérêts industriels qui étaient en jeu et surtout la nouvelle volonté des citoyens, du pouvoir politique, de se sentir désormais véritablement associés aux prises de décision, d'y apporter une valeur ajoutée, c'est-à-dire de ne plus se voir imposer des solutions toutes faites.

Dans ces conditions, il est raisonnable de supposer que, au moins jusque dans les premières décennies du 21ème siècle, des moyens élevés continueront d'être assurés aux recherches sur les déchets à vie longue et que celles-ci resteront le plus ouvertes possibles. Il est également raisonnable de supposer que la clarification actuelle des rôles respectifs des experts (chercheurs et techniciens) et des décideurs sera préservée, à savoir que les premiers se donneront la mission de poser à travers leurs travaux le cadre des décisions mais sans trancher.

Les décisions qui seront prises dépendront fortement du contexte économique et politique, national, voire international, des décennies à venir.

Ce fait nourrit deux séries de questions très fortement liées l'une à l'autre :

- *Jusqu'où faut-il élargir le contexte, scientifique, économique, industriel, social, pour correctement prendre en compte les virages concevables sur la question des déchets à vie longue ?*
- *Dans chacune des composantes de cet environnement, quel est l'horizon temporel aujourd'hui accessible à la prospective ?*

Ce qui est en jeu derrière ces questions est de savoir quelle peut être la robustesse des solutions étudiées à leur environnement extérieur, et leur capacité à s'adapter ou résister aux ruptures éventuelles qui pourraient se produire.

III.A. Éléments scientifiques :

La loi de 91 fixe un cadre délibérément le plus large possible aux recherches; à l'intérieur de celui-ci, c'est aux avancées scientifiques et techniques qu'il appartient d'élaborer les outils opérationnels qui indiqueront progressivement le cahier des charges envisageable.

En 1997, 6 ans après la relance des travaux de recherches par la Loi de 91, compte tenu des échelles de temps du nucléaire, les résultats sont encore très fragmentaires. Ceci posé, les recherches conduites dans le passé, ainsi que les retours d'expérience via la coopération avec l'étranger (comme avec le laboratoire souterrain de Mol en Belgique) ont fourni de très instructifs apports méthodologiques; un gros travail de réflexion a déjà été réalisé; des équipes spécifiques ont été considérablement renforcées, voire montées de toutes pièces, et dotées de moyens importants.

Sur le plan conceptuel, il est ainsi aujourd'hui possible de remettre en perspective le contenu des 3 axes de la Loi de 91.

Cadrons d'abord le débat sur le plan scientifique.

(Nota : le lecteur non familier des questions nucléaires pourra d'abord se reporter à l'Annexe scientifique qui présente les concepts nécessaires à la compréhension du sujet des déchets à vie longue).

III.A.1. Le stockage souterrain des déchets à vie longue :

Objectif : Démontrer la sûreté du concept, sur un site réel.

L'option historiquement privilégiée pour les déchets à vie longue est un stockage dans des formations géologiques profondes (cf II.B.).

Techniquement, un site de stockage est un simple ouvrage de type minier (si ce n'est, bien sûr, qu'il a vocation à être rempli...). Mais le véritable point-clé est sa sûreté, à savoir : la capacité du stockage à assurer le confinement des déchets radioactifs qui y seront placés, et ce, à titre définitif, c'est-à-dire sans besoin d'une intervention humaine ultérieure.

Il s'agit de garantir que, par la seule superposition de la barrière des colis, d'une barrière ouvragée sur le site et de la barrière géologique, le retour des radionucléides à l'Environnement et à l'homme sera limité à de très faibles doses pendant toute la durée de décroissance radioactive des éléments initialement stockés.

Ce problème se pose à la fois :

- pendant l'exploitation du site

(de quelques dizaines d'années (à quelques siècles ?))

- après la fermeture du site

(problématique d'un "retour à la nature" du site, sans surveillance humaine)

En 1991, la DSIN s'est livrée à un exercice de définition de ce que devraient être les objectifs fondamentaux de sûreté à atteindre sur un stockage géologique : la RFS (ou Règle Fondamentale de Sûreté) III.2.f - bien qu'il ne s'agisse pas à proprement parler d'une Règle Fondamentale de Sûreté, ces dernières ayant en effet vocation première à s'appliquer à des installations ou des concepts déjà existants.

Or, la connaissance des mécanismes du retour des radionucléides à l'Environnement depuis le sous-sol est aujourd'hui trop rudimentaire pour que puisse a priori être défini un cahier de spécifications techniques pour le stockage et les colis à y stocker.

En termes de radioprotection, la RFS III.2.f a ainsi fixé l'objectif minimal de confinement requis "par l'amont", c'est-à-dire les doses absorbées par l'homme en bout de chaîne :

(i) *Équivalents de dose individuels à limiter à 0,25 mSv/an (cf Annexe Scientifique) pour des expositions prolongées liées à des événements certains ou très probables (comprendre : dans les conditions habituelles de l'Environnement autour du site, y compris pour les résidents humains permanents en surface, et ce, pendant toute la période de décroissance radioactive des colis);*

(ii) *Situations hypothétiques correspondants à des événements aléatoires (d'origine naturelle ou associées à des actions humaines, comme une intrusion accidentelle sur le site (supposé oublié dans, mettons, quelques siècles) par, par exemple, un forage aquifère) : les expositions individuelles (...) associées aux situations hypothétiques dont il apparaît qu'elles doivent être retenues dans la conception du stockage devront être maintenues suffisamment faibles par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes.*

Les recherches actuelles ont ainsi pour objet de bâtir progressivement un modèle de retour des radionucléides à l'homme.

Le travail à réaliser a deux directions :

(i) Une compréhension qualitative théorique des mécanismes devant être pris en compte :

Des bibliothèques de données de décroissance radioactive (période radioactive, filiation, probabilité de branchement selon des modes de désintégration spécifiques) ont été progressivement bâties depuis les débuts de l'ère nucléaire.

Des bibliothèques de paramètres physico-chimiques pour les isotopes radioactifs (par exemple, la solubilité dans l'eau) ont également été développées.

Celles-ci doivent, le cas échéant pour certains éléments, être affinées.

Il faut par ailleurs bâtir un modèle de tenue mécanique des colis, de tenue des conteneurs à la corrosion, de mise en eau des colis, de dissolution des colis, compte tenu de l'environnement géologique proche et des conditions physico-chimiques "aux limites" dans l'environnement géologique lointain.

Méthodologiquement, la démarche est naturellement indépendante du type de colis considéré : verres de fission, ou combustibles usés placés en conteneurs.

Une fois des radionucléides libérés hors de la barrière du colis, il s'agit de comprendre leur comportement au sein des barrières ouvragées du site (un confinement via la bentonite par exemple) : solubilité, reprécipitation, migration.

Une équation de diffusion dans l'environnement géologique est à établir, compte tenu des roches (fracturation), des conditions physico-chimiques, du régime des eaux etc. Il s'agit ensuite de comprendre les voies possibles de retour à la surface, puis les mécanismes de percolation et reconcentrations éventuels de certains éléments dans l'Environnement et les chaînes alimentaires.

La compréhension des effets réels des faibles doses de radioactivité, aujourd'hui estimés sur la base d'extrapolations à partir des fortes contaminations (cf Annexe scientifique), sera, par ailleurs, dans la mesure du possible, à affiner.

(ii) Compte tenu de la diversité des éléments à prendre en compte dans (i), la caractérisation effective des conditions géochimiques du ou des futurs sites de stockage ainsi qu'un travail de géologie prospective pour évaluer la stabilité dans le temps de ces conditions, en clair, l'étape des *laboratoires souterrains*, est par ailleurs incontournable :

- Il serait parfaitement envisageable que, d'un site à l'autre, les radioéléments migrant le plus vite vers l'environnement ne soient pas les mêmes, et que, de ce fait, aucun modèle purement théorique ne soit capable d'être prédictif a priori.
- De plus, en France, la nature géologique des trois sites sélectionnés pour des laboratoires souterrains (argile dans La Meuse et à Marcoule, granite dans la Vienne) permettra d'établir une comparaison de l'efficacité relative des deux types d'environnement géologique.

La complexité des réalités à intégrer est un véritable défi pour la recherche : le problème de la sûreté est multidisciplinaire et demande de mettre en synergie experts des sciences de la terre (géologues) et experts de la technologie (conteneurs, barrière ouvragée), qui n'ont pas le même langage et les mêmes outils.

Ceci trouve sa plus explicite traduction dans les difficultés actuellement rencontrées de définir un critère de toxicité et une liste de "radionucléides importants pour la sûreté":

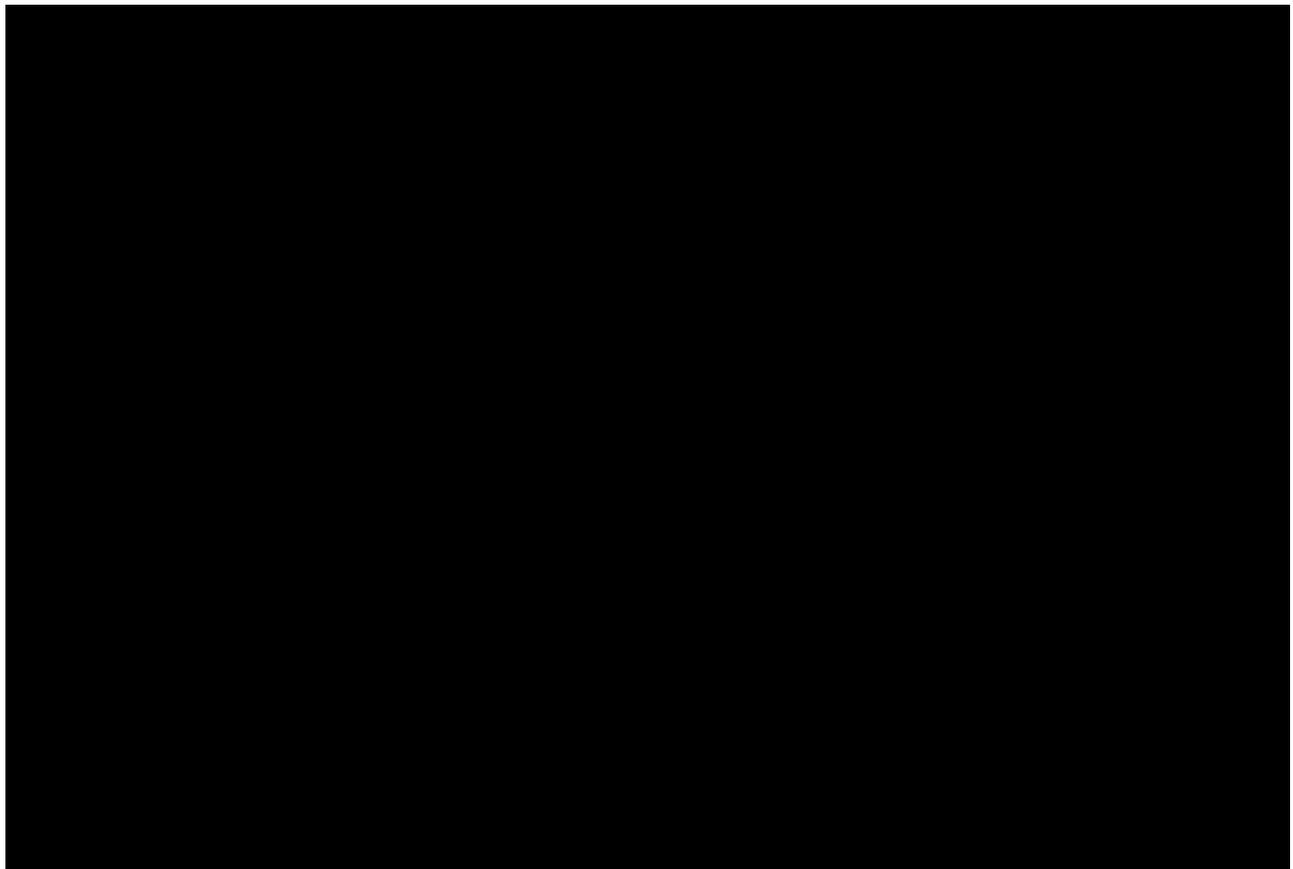
Le problème du stockage géologique a longtemps été abordé en première approche avec la notion de *radiotoxicité potentielle*. A savoir : le danger immédiat que pourrait représenter pour l'homme, du fait des éléments présents dans un site et de leur toxicité à l'ingestion, une contamination directe par les colis de déchets, sans la moindre barrière.

La toxicité des éléments à stocker était ainsi directement corrélée à la conversion en doses biologiques des énergies émises au cours de la décroissance radioactive des colis.

(cf courbe, extraite volontairement d'un ouvrage d'ingénierie nucléaire de 1981, et dont les données, en termes de radiotoxicité potentielle, sont toujours d'actualité - "Nuclear Chemical Engineering", Mac Graw Hill -.

L'unité biologique ici considérée est le facteur théorique de dilution dans l'eau pour rendre inoffensive chez l'homme une masse initiale de combustible usé.

Le niveau de référence est la facteur de dilution de l'Uranium naturel, l'idée sous-jacente étant que, lorsque la radiotoxicité du colis a décru jusqu'à ce niveau, on peut considérer qu'a été rendu à la nature la quantité de radioactivité qui avait été prise lors de l'extraction du minerai d'Uranium naturel pour fabriquer du combustible).



En termes de radiotoxicité potentielle, on voit ainsi sur la courbe que les actinides deviennent au-delà de mille ans le terme prépondérant et qu'il y aurait là matière à justifier d'un point de vue environnemental et pratique les politiques actuelles de retraitement du Plutonium et de l'Uranium ainsi que les recherches conduites sur la séparation poussée des actinides : ce serait une sécurité réduisant d'un ordre de grandeur (de 1 million d'années à 100 000 ans) l'échelle de temps à considérer pour la démonstrabilité.

Mais ce qui est véritablement pertinent pour un site de stockage est la *radiotoxicité à l'exutoire*, après le jeu de rétention des multiples barrières.

Et les priorités pourraient ainsi s'inverser complètement. Examinons qualitativement un cas :

^{129}I est le produit de fission le plus actif au-delà d'un millier d'années. Il est aujourd'hui séparé à l'Usine de La Hague puis dilué dans l'océan. Mais on pourrait en envisager à terme une réintégration dans des verres de fission.

Or,

- D'après la courbe, dilué dans le stockage, en terme de contribution à la radiotoxicité potentielle globale, cet élément paraît parfaitement inoffensif.
 - Mais il faut déjà voir que ^{129}I représente 1% des produits de fission, qui eux-mêmes ne représentent que quelques pour cent de la masse de métal initial. Cela signifie en fait que, concentré, ^{129}I est, par exemple, autrement plus toxique que l'Uranium naturel.
 - Et le seuil de référence à base d'Uranium naturel prête lui-même à réflexion : concentré, l'Uranium naturel est radiotoxique, comme le savent bien les travailleurs de l'industrie minière et comme l'indique sur le graphe le facteur de dilution de 10^7 requis).
 - On sait qualitativement que les produits de fission sont beaucoup plus solubles dans l'eau que les actinides qui ont tendance à précipiter. La migration de ^{129}I vers la surface pourrait ainsi être nettement plus rapide.
 - Enfin, dans l'organisme humain, ^{129}I a tendance à se concentrer dans la glande thyroïde et à devenir ainsi une source spécifique de cancers.
- ^{129}I ou d'autres produits de fission à vie longue ne deviendraient-ils pas ainsi la véritable priorité pour un stockage en termes de radiotoxicité à l'exutoire ? Tout ce raisonnement, purement qualitatif, sera bien sûr à valider avec l'avancement des recherches.

Par ailleurs, la réalité temporelle d'un stockage, qui en fait in fine un objet de l'ordre des sciences de la nature, reste l'obstacle épistémologique par excellence à une validation scientifique absolue :

- Les premières tentatives de modélisation de la seule lixivation des colis donnent, en 1997, compte tenu des incertitudes, et selon le choix des mécanismes "raisonnablement prépondérants" à prendre en compte, une fourchette de 40 000 ans au million d'années pour la tenue des colis de verres de fission. Ce que l'on peut voir comme une "incertitude logarithmique" de 30% (de $10^{4.6}$ à 10^6 ans ... reflet fidèle du type d'échelles de temps à gérer).
- On ne sait pas simuler le vieillissement accéléré d'un ensemble aussi complexe qu'un colis de déchets à vie longue placé dans un environnement géologique : il faudrait en fait pouvoir suivre un colis pendant toute sa durée de décroissance radioactive.

Pour répondre à cette dernière difficulté, deux démarches ont néanmoins été développées :

- (i) La coopération internationale avec des groupes de travail commun, des exercices inter comparaison de modèles, de bases de données, des programmes de recherche commun : l'objectif est de parvenir à bâtir progressivement un consensus scientifique international, qui offrira a priori une meilleure sécurité quand à la fiabilité des recherches.

Mentionnons ainsi le Projet Mirage (Migration des Radionucléides dans la Géosphère)

de la CCE¹ depuis 1983, qui mobilise 40 laboratoires et organismes au sein de l'Union Européenne (dont le CEA et le BRGM²) et un nombre croissant d'instituts de pays tiers associés par des accords de coopération.

Des exercices inter comparaison sont par ailleurs conduits par l'OCDE/AEN et l'AIEA.

(ii) L'idée de la possibilité d'une validation partielle sur le terrain par des *analogues naturels*.

La terminologie a été introduit en 1978 par un épistémologue, Rodney Ewing.

Elle est "(...) à utiliser de manière restrictive pour des matériaux, des conditions et des mécanismes géochimiques, géologiques ou géobiologiques qui présentent une similarité chimique, physique ou structurale suffisante avec des mécanismes susceptibles de se produire dans tout ou partie d'un site de stockage"

Il n'existe pas d'analogie globale d'un stockage de déchets radioactifs.

Mais l'on peut trouver :

- des analogues naturels des matrices de conditionnement des déchets : verres naturels et artefacts archéologiques.

- des analogues naturels des barrières géologiques; l'AEN et la CCE ont lancé des projets internationaux pluridisciplinaires d'étude de gisements d'Uranium et de Thorium dans des contextes géologiques divers pour évaluer processus de confinement et transport. Le réacteur nucléaire naturel d'Oklo, découvert en 1972, une mine d'Uranium au Gabon qui a produit quelques tonnes de Plutonium et de produits de fission il y a deux milliards d'années fait actuellement l'objet d'une étude internationale approfondie internationale sous égide du CEA et de l'Union Européenne : il peut fournir un très instructif exemple des capacités de rétention de l'environnement géologique pour les produits de fission et les actinides.

Ici encore, la démonstration n'est pas une absolue mais l'on peut avoir avec les analogues naturels une source d'informations aidant à l'applicabilité et l'acceptabilité de l'approche des scientifiques.

Conclusion :

L'idée est de bâtir, sur un site réel, progressivement, à l'aide des apports méthodologiques internationaux et des analogues naturels, un modèle rudimentaire qui, qualitativement dans un premier temps du moins, donne les mécanismes prépondérants et les grandes tendances de comportement. Cela permettra ainsi d'identifier des radionucléides importants pour la sûreté de chaque site spécifique et, progressivement, d'élaborer une liste de spécifications pour le stockage : sans doute cette démarche n'aboutira-t-elle qu'en 2006 avec les recherches jusqu'alors conduites.

Le risque est de se retrouver face à un problème scientifique qui reste fondamentalement ouvert.

En termes d'intrusion sur le sites, des questions demeureront ainsi toujours en suspens.

Mais les scientifiques en France sont confiants d'arriver à une démontrabilité du concept, au moins en commençant par le cas plus "simple", homogène, des colis de déchets pris dans des matrices de verre (par opposition au combustible irradié).

¹Commission des Communautés Européennes

²Bureau de Recherche Géologique et Minière

III.A.2. Séparation, transmutation et incinération

Nous allons décrire dans cette partie les enjeux et les possibilités offertes par le premier axe de la loi de 91. Cet axe se divise en deux parties.

La première concerne la *séparation*, c'est-à-dire l'ensemble des procédés de traitement chimique des combustibles irradiés ayant pour but d'en extraire et de séparer les nombreux éléments présents. Le tableau suivant donne la composition de deux exemples de combustibles irradiés. Les chiffres sont indiqués en kg par tonne de métal lourd initial. Le tableau montre l'extrême complexité chimique et isotopique d'un tel combustible.

	élément / isotope	combustible UOX 33000 MWj/t ¹	combustible MOX 43500 MWj/t ²	période de l'isotope
	U 238	945	873	4,5 10 ⁹ ans
	U 235	11		7,04 10 ⁸ ans
	Pu 238	0,17	2,0	86 ans
	Pu 239	5,72	21,5	24 390 ans
	Pu 240	2,21	17,9	6 357 ans
	Pu 241	1,14	8,3	13,2 ans
	Pu 242	0,49	7,3	379 000 ans
actinides mineurs	Np 237	0,42	0,16	2 140 000 ans
	Am 241	0,27	2,95	433 ans
	Am 243	0,10	1,88	7 400 ans
	Cm 244	0,02	0,80	17,6 ans
	Cm 245	≈0	0,12	8 532 ans
Produits de fission	à vie courte	31,5	45,5	-
	Se 79	0,005	0,005	65 000 ans
	Zr 93	0,715	0,62	1 500 000 ans
	Tc 99	0,823	1,00	210 000 ans
	Pd 107	0,20	0,66	6 500 000 ans
	Sn 126	0,02	0,04	100 000 ans
	I 129	0,17	0,27	16 000 000 ans
	Cs 135	0,35	0,98	2 300 000 ans

1 : enrichissement à 3,5 %, composition après 4 ans de refroidissement (source CEA)

2 : 8,2% de Pu issu d'un UOX retraité à 45000 MWj/t ; valeurs après 5 ans de refroidissement

La seconde partie concerne la *transmutation* et l'*incinération*, deux conséquences possibles du bombardement neutronique d'un noyau, qui ont pour but de le transformer en un ou plusieurs noyaux moins nocifs.

Bien qu'on les considère souvent séparément, car ils font appel à des procédés totalement distincts, *séparation* et *transmutation-incinération* sont indissolublement liés car il faut savoir comment utiliser en réacteur les noyaux que l'on peut séparer.

III.A.2.a. Deux enjeux

Un enjeu énergétique

Certains noyaux présents dans un combustible usé sont en fait des éléments *fissiles*, issus de la *fertilisation* d'éléments stables. Le cas le plus important est celui du ^{239}Pu issu de ^{238}U par bombardement neutronique. Ces noyaux ont une capacité énergétique très intéressante. Par exemple, la consommation d'un assemblage UOX (enrichi à 4% d' ^{235}U) libère dans un REP environ 150 GWhé mais produit suffisamment de ^{239}Pu pour pouvoir produire théoriquement dans le même REP 30 GWhé supplémentaires. Il est donc intéressant, *a priori*, de récupérer ces noyaux afin de les réutiliser, ce qui accroît l'indépendance énergétique de la France qui n'a pas à acheter à l'étranger les noyaux d' ^{235}U correspondants.

Sur le plan économique, il faudra tenir compte du coût élevé d'extraction de ces noyaux énergétiques lors du retraitement, afin de déterminer, en fonction du cours de l'Uranium naturel, si cette solution est rentable. La partie III-B donne quelques ordres de grandeur économiques.

Un enjeu pour le stockage géologique

Le grand fantasme du gestionnaire de déchets radioactifs serait assurément que l'on puisse séparer tous les déchets à vie longue pour les brûler dans des réacteurs, afin d'éviter tous les tracas liés à l'ouverture d'un *stockage géologique*. Cette vision idéale se heurte à bien des problèmes pratiques.

D'abord, la combustion des déchets dans les réacteurs n'est jamais totale ni parfaite ; on risque même bien souvent de voir apparaître des noyaux encore plus ennuyeux à gérer.

Par ailleurs, la séparation n'est également jamais parfaite. On sépare aujourd'hui 99,88 % du Plutonium des combustibles usés, ce qui est sûrement un taux record à l'échelle industrielle. L'usine UP2-800 de La Hague "perd" donc par an, environ 10 kg de plutonium lors du process, ce qui représente une activité α d'environ $1,4 \cdot 10^{14}$ Bq. Si l'on désirait "banaliser" cette quantité de plutonium à long terme il faudrait diluer cette quantité dans une masse de l'ordre de $7 \cdot 10^8$ t de matière (un peu moins d' 1 km^3 d'eau) selon les limites réglementaires actuelles (moins de 0,2 Bq/g de Pu). Si, pour éviter le *stockage géologique*, on stocke le Plutonium comme déchet à très faible activité pour lesquels il n'est pas nécessaire de prévoir un confinement particulier, il faudra alors le diluer dans $4 \cdot 10^5$ t de matière (limite de moins de 10 nCi/g). Cela revient à construire l'équivalent d'une pyramide de Khéops tous les dix ans. On voit donc les difficultés associées ne serait-ce qu'avec les pertes marginales des procédés de séparation.

D'autre part, il existe une grande quantité de déchets technologiques de type B qui comportent des éléments à vie longue en faible quantité, ce qui rend très difficile et coûteux leur séparation, mais en concentration trop forte pour que leur dilution en déchets de faible activité soit faisable. Dans l'état actuel de la technologie, ces déchets devront être placés dans un *stockage géologique*. Des

recherches sont cependant en cours pour décontaminer les coques et embouts des combustibles irradiés afin de pouvoir les stocker en surface - mais le résidu de décontamination, devra, lui, être enfoui dans le *stockage géologique*.

Ainsi, les programmes de séparation-transmutation ne peuvent qu'espérer permettre de baisser appréciablement la radiotoxicité des colis mis au *stockage géologique*, dans le but d'augmenter sa sûreté. Les priorités des recherches doivent donc être données aux éléments les plus nocifs dans le cadre du *stockage géologique*. Il s'agit en priorité des produits de fission à vie longue, qui bien que présents en faible quantité sont extrêmement mobiles dans le milieu géologique. Viennent ensuite les actinides mineurs et le Plutonium. Comme nous le verrons, la recherche aura historiquement suivi une démarche inverse, étudiant d'abord le Plutonium, les actinides mineurs, puis les produits de fission.

III.A.2.b. La séparation

Les procédés de séparation sont basés sur des processus chimiques. Ils extraient donc les éléments sans tenir compte de leur isotopie. Le problème de la séparation isotopique sera abordé dans le paragraphe suivant.

Certains procédés en cours d'étude dans le monde sont pyrométallurgiques (températures très élevées, réactions dans un bain de combustible irradié fondu en milieu très corrosif). Cette technologie n'est pas encore mûre et semble produire des quantités de déchets technologiques très élevées.

Les procédés utilisés aujourd'hui se fondent sur des réactions en milieux aqueux à température ambiante. Ils sont dits hydrométallurgiques. Le combustible utilisé est tout d'abord cisailé puis dissous dans une solution d'acide nitrique. On sépare les "coques et embouts" restés sous forme solide, c'est-à-dire les parties métalliques de l'élément combustible. Ces éléments forment des déchets B car ils contiennent des produits d'activation à vie longue. On mélange ensuite la solution obtenue avec des molécules présentant une affinité pour des éléments particuliers de la solution, afin de les extraire par précipitation.

Le procédé actuel de La Hague, PUREX, se base ainsi sur la molécule d'extraction TBP, qui fixe l'Uranium et le Plutonium, laissant les autres éléments dans la solution qui sera vitrifiée. On peut considérer aujourd'hui que la séparation de l'Uranium et du Plutonium est bien maîtrisée.

Séparation des actinides mineurs

La recherche sur la séparation des actinides mineurs est déjà en cours depuis longtemps, mais a été fortement relancée par la loi de 91. C'est un problème de chimie, où il faut trouver une molécule extractrice convenable. La recherche est compliquée pratiquement par le caractère très radioactif de certains actinides, ce qui rend leur manipulation difficile.

Le Neptunium est un cas particulier car il est en fait déjà extrait à 70 ou 80% par le TBP, puis séparé de l'Uranium et du Plutonium.

L'Américium et le Curium ne sont, eux, pas du tout extraits par cette molécule. De nouvelles molécules ont donc été développées et expérimentées. C'est la base du procédé DIAMEX étudié au CEA, qui extrait conjointement ces deux éléments. Il se pose alors un problème difficile, celui de la séparation entre ces actinides et les lanthanides (produits de fission à la structure électronique similaire). Il faut ensuite étudier la séparation entre l'Américium et le Curium.

D'une manière générale, les recherches dans le domaine des actinides mineurs sont facilitées par une relative analogie entre les propriétés chimiques des éléments concernés, ce qui n'est pas du tout le cas pour les produits de fission, qui sont chimiquement très variés. Il semble envisageable que ces recherches, si elles sont poursuivies, aient atteint la phase de la démonstrabilité technique en 2006.

Séparation des produits de fission à vie longue

La recherche sur ce point est encore embryonnaire, car la communauté scientifique française vient tout juste de se rendre compte de l'importance de ces éléments dans la radiotoxicité à l'exutoire d'un *stockage géologique*.

Cependant, dans le procédé PUREX actuel, trois produits de fission à vie longue sont déjà extraits. Le Technétium est en fait extrait à 80% par la molécule TBP (les 20% restant étant insolubles), et le process produit un effluent riche en cet élément. Le Zirconium est également extrait par le TBP mais sans être par la suite isolé spécifiquement.

L'Iode forme un cas unique. Il est extrait grâce à sa volatilité au début du process. Il est ensuite fixé lors du lavage à la soude des effluents gazeux, puis rejeté en mer. C'est le seul exemple en France de gestion de déchet radioactif à vie longue par dilution. L'usine UP2-800 à La Hague rejette de l'ordre de 150 kg d' ^{129}I par an soit une activité de 900 GBq. La limite réglementaire de concentration de cet élément pour ne pas avoir à appliquer de mesures spécifiques est de 2230 Bq/m³ d'eau (60 nCi/m³). Il faut donc diluer cet iode dans 4 10⁸ m³ d'eau de mer chaque année. Des polémiques récentes montrent que les techniques de dilution en mer ne sont peut-être pas bien maîtrisées : on observe des reconcentrations de l'iode radioactive dans le biotope.

Une molécule extractante a été trouvée pour le Césium, les recherches étant encore au stade du laboratoire. Par contre, aucune recherche n'a été effectuée sur la séparation d'autres produits de fission.

Par rapport à leur enjeu pour le stockage géologique, ces recherches sont donc bien peu avancées. En 2006, la séparation et la fixation du Technétium, de l'Iode, du Zirconium, du Césium pourrait être au point. Rien n'est connu sur les possibilités de séparation des autres produits de fission à vie longue. La prise de conscience de leur importance est extrêmement récente.

III.A.2.c. Le problème des compositions isotopiques : de l'enrichissement au toilettage

L'isotopie des éléments séparés est un paramètre important si l'on cherche à les transmuter ou à les incinérer, car il conditionne leur comportement en réacteur (cf. paragraphe suivant). Sauf le Technétium qui est pur isotopiquement, tous les autres éléments sont présents sous la forme d'un mélange isotopique. Le tableau donne quelques ordres de grandeur de pureté isotopique de produits de fission à vie longue pour un combustible en REP.

élément	⁹⁹ Tc	¹²⁹ I	⁹³ Zr	¹²⁶ Sn	¹³⁵ Cs	¹³⁷ Cs	⁷⁹ Se
pureté isotopique	1,0	0,81	0,21	0,40	0,10	0,31	0,09

(UOX 3,5% à 33000 MWj/t - source : rapport CNE 95)

Il faut alors souvent, pour contrôler efficacement les réactions d'incinération et de transmutation, purifier isotopiquement les éléments. Pour cela, plusieurs méthodes existent. Les plus classiques utilisent la légère différence de densité entre les isotopes. Ce sont les méthodes de centrifugation ou de diffusion gazeuse à travers une membrane.

L'enrichissement isotopique par laser est une nouvelle méthode développée par le CEA. Elle utilise le fait que les électrons des différents isotopes ont des niveaux énergétiques très légèrement différents à cause de la masse variable du noyau. Une vapeur de l'élément à purifier est illuminé par un laser subtilement calibré qui ionise un isotope particulier. Cette technique entre aujourd'hui en phase de pilote industriel ; elle devrait être mûre pour 2010.

L'exemple de la dégradation isotopique du Plutonium en REP

Cet exemple montre bien l'influence de la composition isotopique sur les propriétés de l'élément à incinérer en réacteur, et montre aussi l'éventuelle rétroaction des choix de séparation-incinération sur la conception des réacteurs.

Le Plutonium des combustibles usés est un mélange d'isotopes qui ont des propriétés très différentes dans le flux de neutrons thermiques (lents) des REP : les isotopes pairs du Plutonium sont des poisons car ils tendent à capturer des neutrons sans fissionner, alors que les isotopes impairs du Plutonium sont au contraire très fissiles. Le tableau suivant montre les sections efficaces moyennes de deux isotopes du Plutonium pour des neutrons lents ou des neutrons rapides

	section efficace (barns) neutrons thermiques (REP)		section efficace (barns) neutrons rapides (RNR)	
	capture	fission	capture	fission
Pu 238	27,7	2,4	0,58	1,1
Pu 239	61,3	110	0,45	1,79
Pu 240	127	0,58	0,52	0,39
Pu 241	39,1	119	0,42	2,39

(source National Academy of Science)

Au cours de la combustion d'un combustible dans un REP, la proportion des isotopes fissiles tend à diminuer. C'est d'ailleurs ce qui rend les REP très peu proliférants, car il est impossible d'en extraire du ^{239}Pu pur ; or la présence d'isotopes pairs du Plutonium empêche la fabrication d'un explosif nucléaire efficace.

Au bout de deux ou trois passages en réacteur REP, le Plutonium est très dégradé (il comporte beaucoup d'isotopes pairs). Si l'on fabrique des combustibles MOX en mélangeant de l'oxyde de Plutonium avec de l'oxyde d'Uranium naturel, il faut augmenter beaucoup la concentration en Plutonium pour compenser les absorptions neutroniques par ses isotopes pairs. Cela pose un problème de sûreté des réacteurs. Il faut généralement prévoir quelques barres de contrôle supplémentaires, pour compenser une réactivité plus élevée. Surtout, en cas de vidange partielle de la cuve ou de présence d'une bulle de gaz importante, les réactions nucléaires se produisent avec des neutrons rapides (car l'eau, qui sert à modérer les neutrons, est absente) ; or les isotopes pairs du Plutonium deviennent alors aussi fissiles que les autres et la réaction peut s'emballer localement. On dit alors que le coefficient de vide devient localement positif. Cela se produit pour des concentrations en Plutonium supérieures à 12%.

Pour s'affranchir de ce problème qui remet en cause le multirecyclage du Plutonium, deux solutions ont été imaginées. L'une est de mélanger l'oxyde de Plutonium dégradé avec de l'oxyde d'Uranium enrichi afin de compenser cette dégradation. L'autre est de "toiletter" le Plutonium en l'enrichissant en fait en isotopes fissiles, grâce au procédé laser. Reste alors un résidu riche en isotopes pairs du Plutonium, que l'on ne peut gérer à terme qu'en réacteur à neutrons rapides ou en le plaçant au *stockage géologique*.

III.A.2.d. Transmutation et incinération

Comment parvenir à faire évoluer un isotope placé dans un flux neutronique afin d'en diminuer la nocivité ? Il faut d'abord distinguer la nocivité à long terme et la nocivité à court terme. La transformation d'un élément à vie longue en un élément à vie courte peut ne pas être une bonne solution si le nouvel élément est très actif et crée des dangers d'irradiation élevés lors de sa manipulation.

On distingue deux méthodes de gestion des isotopes à transmuter ou incinérer. En mode homogène, ils sont mélangés, à faible concentration, dans tout le combustible. En mode hétérogène, ces isotopes sont concentrés dans des cibles dédiées, placées à des endroits idoines dans le coeur. Le recyclage hétérogène permet de placer les cibles en périphérie du coeur et donc de modifier au minimum les caractéristiques de celui-ci, tout en utilisant les neutrons perdus.

Dans un réacteur fonctionnant en fission spontanée, il n'est pas possible de placer trop de poisons neutroniques (isotopes capturant des neutrons) dans le coeur sous peine d'étouffer la réaction en chaîne. Un paramètre important est alors l'excédent en neutrons dans le coeur. Le coeur des RNR comporte un léger excédent de neutrons alors que le coeur des REP supporte très peu d'empoisonnement.

Afin de dépasser cette limite, un concept séduisant est celui du réacteur hybride, ou amplificateur d'énergie. Un coeur sous-critique est couplé à un accélérateur de protons qui produit des neutrons par spallation dans une cible. Ce concept, notoirement défendu par Rubbia, mais qui commence à être étudié par le CEA, permet de disposer d'un fort excédent de neutrons. Il faut bien faire attention que ce n'est pour l'instant qu'un concept théorique.

La transmutation ou l'incinération d'un isotope n'est jamais parfaite. Il reste toujours un pourcentage d'isotopes non transmutés. Cela nécessite des passages répétés en réacteur entre des phases de séparation chimique, à moins de concevoir des cibles dédiées soumises à une irradiation très longue, ce qui nécessite de vastes recherches en métallurgie pour garantir la tenue des gaines.

Les produits de fission à vie longue

Les produits de fission à vie longue sont des petits noyaux résultants de la fission de noyaux lourds ; ils ne peuvent fissionner. Il n'est donc possible que de les transmuter par absorption de neutrons. Cela provoque donc une consommation élevée de neutrons. Leur transmutation n'est par conséquent envisageable que dans un réacteur hybride, ou à la rigueur, en petites quantités, dans un RNR.

La composition isotopique des éléments à recycler est très importante. Les différents isotopes ont en effet des comportements distincts. Par exemple, le Césium est présent dans les combustibles irradiés sous la forme d'un mélange isotopique comprenant du ^{133}Cs (stable) et du ^{135}Cs (l'isotope nocif à vie longue). Plonger le ^{133}Cs dans un flux neutronique crée du ^{134}Cs , isotope très instable de période égale à 2 ans. De toute façon, placer des isotopes stables en réacteur est pénalisant car ils absorbent inutilement des neutrons. Il faut chercher systématiquement à purifier l'isotope à vie longue dont on veut se débarrasser, sauf s'il domine le mélange isotopique.

Il faut également faire attention au comportement sous flux neutronique de l'isotope résultant de la transmutation de notre produit à vie longue, car on ne peut le retirer aussitôt transmuté. Si cet élément est stable et qu'on le transmute à nouveau en un élément instable, aucun gain n'aura été réalisé. Heureusement, pour ^{129}I , ^{99}Tc ou ^{135}Cs , des absorptions de neutrons multiples donnent des isotopes stables.

A cause des problèmes non résolus de purification isotopique, seule la transmutation du Technétium, présent sous forme monoisotopique ^{99}Tc , est en cours d'étude. Réussir à transmuter les autres éléments nécessitera d'énormes investissements de recherche, pour les séparer isotopiquement puis pour les transmuter. Un tel procédé sera de toute façon extrêmement pénalisant pour le réacteur utilisé.

Le Plutonium

Le Plutonium est le seul actinide qu'on incinère aujourd'hui (dans les combustibles MOX). Les problèmes liés à sa dégradation isotopique ont été évoqués plus haut. Ils illustrent les difficultés liées au multirecyclage des actinides.

Sa grande quantité et son potentiel énergétique en font certainement l'actinide le plus rentable à recycler. Recycler les autres actinides revient à appliquer la même technologie, avec des flux plus modestes.

Les actinides mineurs

Les actinides mineurs sont des noyaux lourds qui peuvent soit être transmutés par absorption de neutrons, soit incinérés par fission. Globalement, ils ont tendance à transmuter plutôt qu'à fissionner sous flux neutronique. Cependant, par les neutrons produits lorsqu'ils fissionnent, ils sont beaucoup moins pénalisants pour le bilan neutronique d'un réacteur que les produits de fission à vie longue.

Certains isotopes des actinides mineurs sont très instables ; cela rend la manipulation des actinides mineurs issus des combustibles irradiés très dangereuse. Fabriquer des combustibles ou des cibles comprenant ces composés demande des installations comportant des cellules blindées très onéreuses. En comparaison, la manipulation du Plutonium issu des combustibles irradiés ne nécessite que des boîtes à gants.

Notons finalement que l'incinération des actinides mineurs peut produire des produits de fission à vie longue, ce qui est particulièrement néfaste du point de vue du *stockage géologique*.

Les recherches, en particulier sur Superphénix, en sont au stade expérimental.

III.A.2.e. Conclusions sur la séparation-transmutation

La séparation puis la transmutation-incinération d'isotopes présents dans le combustible irradié afin d'en diminuer la radiotoxicité dans le cadre du *stockage géologique* impose de considérer en priorité les produits de fission à vie longue. Leur transmutation est très pénalisante pour un réacteur, voire impossible en REP, car ils absorbent beaucoup de neutrons. Seul l'Amplificateur d'Énergie de Rubbia pourrait convenir, mais il est très loin d'être opérationnel industriellement.

La transmutation ou l'incinération des actinides est plus facile, car moins pénalisante pour le réacteur, mais impose des contraintes de manipulation très fortes du fait de leur très haute activité.

Toutes ces techniques imposent des coûts très élevés de séparation, de "toilette" isotopique et de moindre rendement des réacteurs. Il convient donc d'arbitrer entre ces coûts (à court terme) et les bénéfices en terme de sûreté à long terme. Ce point est discuté en III-B.

III.A.3. L'entreposage à long terme

L'entreposage à long terme des déchets en surface est le troisième axe de recherche de la loi de 91. Cet axe a été jusqu'à ce jour assez peu exploré, comme le déplore le député Christian Bataille dans son rapport de 1996 : "le vote de la loi, contrairement à ce qui s'est passé pour les deux autres voies, n'a pas entraîné sur ce point d'avancée significative de la recherche ni de progrès technique véritablement marquant."

Les déchets C ou les combustibles irradiés sont très radioactifs et produisent également beaucoup de chaleur. Un système d'entreposage doit donc répondre à deux exigences : protéger l'environnement contre les rayonnements et permettre l'évacuation de la chaleur résiduelle (afin d'éviter la montée en température du colis et les conséquences sur son intégrité structurelle).

Les combustibles irradiés sont entreposés couramment en piscine. L'eau protège contre les rayonnements ; la chaleur est évacuée et la contamination de l'eau surveillée lors de son recyclage. Le retour d'expérience sur ce mode d'entreposage est important, puisque des combustibles UOX irradiés dorment en piscine depuis une quarantaine d'années aux États-Unis, sans problème particulier. Il convient cependant de vérifier le comportement de combustibles soumis à de plus forts taux d'irradiation et de combustibles MOX. Il n'est pas envisagé de laisser ces combustibles plus d'une cinquantaine d'années en piscine, à cause de problèmes potentiels de corrosion.

A plus long terme, il faut recourir à l'entreposage à sec. Le combustible irradié ou le colis de déchet est confiné dans une structure protégeant des rayonnements (masse de plomb, etc.) et permettant à la chaleur d'être évacuée, par convection naturelle ou forcée. Ce mode d'entreposage pose principalement deux problèmes :

- assurer la qualité du conteneur, en particulier au niveau de ses soudures,
- assurer que la reprise du colis se fera sans difficulté au terme de l'entreposage. A ce titre, il faut étudier la corrosion et la dégradation de l'enveloppe dû au rayonnement.

L'évacuation de chaleur par convection naturelle est évidemment plus robuste que l'évacuation par convection forcée, car elle ne repose que sur l'action de la gravité et pas sur des appareils actifs. Par contre, elle induit un entreposage beaucoup moins dense.

De toute façon, l'entreposage ne saurait constituer une solution définitive au problème. Utiliser ces techniques revient à temporiser jusqu'à ce qu'on mette en place une méthode ultime permettant de se débarrasser des déchets.

III.B. Éléments économiques

Le mode de calcul des chiffres exposés dans cette partie est exposé en annexe. Leur valeur n'est qu'indicative ; elle est établie à 20% près ; néanmoins, ces chiffres permettent de mettre en valeur les grandes tendances.

La grande particularité de l'industrie nucléaire est d'être très capitalistique et également d'avoir des effets d'échelle importants (plus le flux de matière dans une installation industrielle est grand, moins son traitement coûte cher à l'unité). Les calculs ont été faits pour un parc électronucléaire correspondant en volume au parc français actuel.

III.B.1. La rentabilité du recyclage du Plutonium et des actinides mineurs

Nous avons comparé les coûts associés à différents cycles, présentés dans un tableau récapitulatif (tableau 1). Nous y comparons les coûts moyens (agrégés) des cycles suivants :

UOX : un seul passage du combustible UOX 4,5% en réacteur puis stockage direct ;

UOX+1MOX : un passage du combustible UOX 4,5% puis recyclage une fois du Plutonium en réacteur avant stockage direct du combustible MOX ;

UOX+2MOX : un passage combustible UOX 4,5% puis deux recyclages du Plutonium en réacteur, avant stockage direct du second combustible MOX. Le second MOX est moins énergétique que les combustibles précédents, car la concentration en Plutonium ne peut pas être augmentée indéfiniment.

MIX : un passage combustible UOX puis un passage MOX puis recyclage du Plutonium dans des combustibles MIX (Uranium enrichi plus Plutonium) mis au stockage direct.

Les calculs tiennent compte des effets d'échelle : la fabrication des combustibles MIX est moins chère à l'unité que celle des MOX car leur quantité est plus grande. Les détails des calculs sont en annexe. L'avant-dernière ligne donne le volume mis au stockage profond par TWhé produit, indicateur de la vitesse de remplissage du stockage géologique. La dernière ligne mesure l'indépendance énergétique de la France en montrant la consommation d'Uranium naturel par TWhé.

Ce tableau ne prend cependant pas en compte les décalages temporels entre les recyclages, il ne fait que des moyennes sur le cycle. Un combustible MOX coûte plus cher individuellement qu'un combustible UOX.

tableau 1 : coût moyen agrégé des différentes options

<i>coûts en cF/kWhé</i>	UOX	UOX+1MOX	UOX+2MOX	MIX
Matière première Unat	1,02	0,90	0,87	0,87
Enrichissement U	1,40	1,22	1,18	1,17
Fabrication combustible	0,51	0,70	0,80	0,80
Total amont du cycle	2,92	2,83	2,85	2,84
Transport combustible irradié	0,10	0,10	0,10	0,10
Retraitement	0	1,06	1,16	0,97
Entreposage	0,29	0,12	0,11	0,13
Conteneur final	0,23	0,03	0,01	0,05
Stockage géologique	0,63	0,18	0,15	0,22
Total aval du cycle	1,26	1,48	1,53	1,46
Total général cF/kWhé	4,18	4,31	4,38	4,30
Volume au stockage (m³/TWhé)	6,35	2,04	1,93	5,86
tonnes de Unat / TWhé	28,6	25,4	24,1	24,7

Globalement, le coût du retraitement est compensé par le moindre coût du stockage des déchets qui sont en volume plus faible et la moindre quantité d'Uranium naturel dans les MOX. Cela rend les alternatives équivalentes, sauf quand la dégradation isotopique du Plutonium obère la capacité énergétique du combustible. Le monorecyclage du Plutonium n'induit donc pas de surcoût significatif dans la mesure où il n'oblige pas à une modification des réacteurs (non pris en compte ici).

L'estimation du coût de transmutation-incinération des actinides mineurs est difficile car aucun processus industriel n'existe encore. Les surcoûts sont dus au nouveau procédé de séparation à mettre en place, à la nécessité de produire le combustible (recyclage homogène) ou les cibles (recyclage hétérogène) en cellule blindée et à une pénalité sur le potentiel énergétique du combustible placé en réacteur. Relativement au kWh électrique, le surcoût le plus important est la fabrication du combustible en cellule blindée (de l'ordre de 1 à 2 cF/kWhé), suivi par la diminution du potentiel énergétique du combustible qui influe négativement sur tous les autres coûts (une diminution de 10% de ce potentiel équivaut à un surcoût d'environ 0,5 cF/kWh), puis par le surcoût du retraitement. Il faut donc s'attendre à une augmentation du coût de l'électricité de quelques centimes par kWhé, ce qui enlèverait au nucléaire sa marge de compétitivité ; une telle technique demande la pérennité de l'industrie nucléaire mais l'empêche paradoxalement par son coût élevé.

Comme montré au III-A-2, la transmutation des produits de fission ne peut pas s'effectuer en REP. Il faut donc développer une nouvelle filière ou disposer de réacteurs à neutrons rapides économiques.

III.B.2. Le nucléaire face aux autres sources d'électricité

Le tableau 2 tente de comparer la production électronucléaire en terme de coûts avec les sources d'énergie concurrentes à court terme (gaz naturel) ou à long terme (charbon). Le scénario de référence dans le cas nucléaire est celui d'un monorecyclage du Plutonium en MOX puis stockage direct du MOX. Le taux d'actualisation a été pris égal à 3%/an.

Ce tableau illustre bien le caractère capitalistique de la production électronucléaire. Son coût est très sensible au taux d'actualisation (coût du capital) et peu au coût de la matière première.

Les autres sources d'énergie nécessitent moins de capital mais sont très liées au coût de leur matière première. Leur coût ne prend pas en compte l'effet de leurs rejets (dioxyde de carbone) sur l'environnement.

tableau 2 : comparaison des différentes sources d'énergie électrique

	nucléaire - REP	gaz naturel	charbon
Puissance unitaire (MWé)	1 450	600	600
coût (ponctuel) d'une unité (MF)	12 000	720	1800
durée de vie (ans)	40	25	30
Exploitation (MF/an)	650	125	170
amortissement (cF/kWhé)	5,4	1,1	2,3
Exploitation (cF/kWhé)	7,0	3,1	4,3
Matière Première combustible (cF/kWhé)	0,9	15	11,9
Fabrication combustible (cF/kWhé)	1,9	-	-
Gestion des déchets (cF/kWhé)	1,5	-	-
Provisions de démantèlement (cF/kWhé)	1,0	-	-
COÛT TOTAL (cF/kWhé)	17,7	19,2	18,5
sensibilité au prix de la matière première¹	0,09	1,5	1,2
sensibilité au taux d'actualisation²	0,91	0,12	0,31

(source : rapports du CERN sur l'Amplificateur d'Énergie)

¹ augmentation du coût en cF/kWhé pour une augmentation de 10% du prix de la matière première

² augmentation du coût en cF/kWhé pour une augmentation de 1% du taux d'actualisation

III.B.3. Les incertitudes de la prédiction des coûts du kWh

Le coût du nouveau kWh installé, calculé avec de nombreuses hypothèses sur le futur, décide des nouveaux investissements et des choix de filière énergétique.

Lorsqu'on calcule des coûts sur de longues périodes, il est impossible de tenir compte des progrès technologiques futurs. On ne peut raisonner qu'en fonction de la technologie actuelle.

Par exemple, on ne peut qu'accorder une confiance limitée aux coûts d'utilisation de l'Amplificateur d'Énergie prédits par Rubbia. Aucune installation nécessaire à son fonctionnement n'a encore été construite, et le saut technologique qu'il représente cache sans doute certaines surprises.

Le coût des matières premières influe beaucoup sur les coût du kWh et sur la compétitivité respective des sources énergies. Comme nous l'avons noté en III.B.2, le nucléaire est bien moins sensible au coût de sa matière première que les sources d'énergie classiques, d'autant plus qu'il n'en utilise que de très faible quantités. Nous ne rentrerons pas ici dans une analyse des stratégies d'approvisionnement énergétique car le sujet sort du cadre de ce mémoire.

L'influence de la réglementation sur le coût du kWh peut être très grande. Par exemple, le pouvoir politique peut imposer des taxes différentielles sur les matières premières pour des raisons d'intérêt

général (taxes sur les déchets et sous-produits, comme par exemple sur le CO₂ pour des raisons d'effet de serre). Il peut aussi imposer des exigences de sûreté impliquant des coûts élevés. Plus généralement, des décisions comme l'ouverture à la concurrence du marché électrique européen peuvent avoir une grande influence sur les stratégies industrielles.

Notons enfin que tous ces calculs de coût du kWh installé prennent en compte une hypothèse sur le taux d'actualisation pour calculer la part de l'amortissement des installations dans le kWh produit. Dans le nucléaire, ce paramètre, difficilement prévisible à long terme, joue un rôle important car l'amortissement des investissements représente 30% du coût du kWh (cf. III.B.2).

Ainsi, les calculs sur le coût du kWhé installés ne sont-ils qu'indicatifs. Ils sont très variables dans le temps.

III.B.4. Les techniques du provisionnement

Actuellement, EDF provisionne le démantèlement des centrales nucléaires et la fin du cycle du combustible, afin de les payer le moment venu. Cette technique a l'avantage de doter EDF d'un cash-flow comptable impressionnant. Elle suppose la pérennité d'EDF ; celle-ci est-elle vraiment garantie à l'horizon d'un ou deux siècles ?

Face à cet inconvénient, des fonds dédiés, indépendants, abondés par EDF, sont en cours de création. A leur tour, ces fonds supposent la pérennité du système financier actuel. Leur gestion doit être sûre afin de disposer le moment venu des sommes initialement prévues. La gourmandise budgétaire des gouvernements successifs peut également faire craindre qu'ils ne fassent main basse sur ces fonds en apportant en échange la garantie que leurs successeurs aux affaires payeront la gestion des déchets et le démantèlement des centrales.

Nous avons montré la difficulté d'assurer la transmission aux générations futures des fonds prévus pour la gestion de nos déchets. Le paragraphe suivant montre à quel point il est difficile de prévoir quelle somme leur sera finalement nécessaire.

III.B.5 Réflexions sur le calcul économique à long terme

L'utilisation par les acteurs du nucléaire du calcul économique classique à des horizons dépassant cinquante ou cent ans amène à s'interroger sur la validité de tels calculs.

Ils supposent d'abord une stabilité de la situation sociale et politique sans précédent. Il suffit de regarder le siècle passé ou l'effondrement de l'URSS pour se rendre compte de la prétention d'une telle prédiction. Ils supposent aussi une évolution stable du système économique. Des titres français de la fin du XIX^e sont aujourd'hui sans valeur, après les efforts de guerre de 14-18 et le krach boursier de 1929.

Même si l'on suppose une stabilité raisonnable des systèmes politiques et économiques, il n'est pas toujours rentable de ne rien faire. On pense généralement que le coût actualisé d'une action donnée

sera toujours plus faible si on la réalise plus tard. Cela incite bien des décideurs à se dépêcher de reporter leur décision. Cela dépend cependant de la robustesse du système face à des agressions externes ou internes (accidents). Le coût légué aux générations futures n'est en effet pas toujours le coût tel qu'on l'a calculé dans une situation idéale. On montre que dans certains cas il est rentable d'agir immédiatement.

Prenons un exemple : supposons que l'on décide de remettre à plus tard (dans un à deux siècles) l'enfouissement définitif des combustibles usés. En attendant, on les entrepose en surface dans des casemates adaptées. Même à 3% par an, il suffit de placer aujourd'hui un centième du coût final du stockage géologique pour pouvoir le payer en entier au bout de 160 ans. Pendant cette période, il peut arriver cependant bien des choses. La conception de notre système peut être défaillante et provoquer un accident grave donc cher. De façon externe, un conflit armé ou une situation d'instabilité sociale peut endommager notre système situé en surface. A-t-on le droit de faire porter alors le coût de la réparation aux générations futures sans l'avoir provisionné ? Il faut alors faire un calcul probabiliste en fonction de la probabilité et du coût d'événements possibles. Il peut même arriver, si la probabilité est forte qu'arrive un accident grave, qu'en dépit du taux d'actualisation il soit préférable d'enfouir ces déchets immédiatement. En tout état de cause, l'équité intergénérationnelle impose de transférer en même temps que le risque un montant provisionné égal à l'espérance finale de coût, en tenant compte des accidents possibles.

Ainsi, prévoir quel montant provisionner est un art bien difficile pour des systèmes peu robustes. Il est donc nécessaire de se doter de systèmes les plus robustes possibles pour pouvoir diminuer le plus possible les charges léguées aux générations futures.

III.B.6. Le coût du stockage géologique

Le coût total du stockage géologique (construction et exploitation) est estimé aujourd'hui à 75 GF. Cette somme est importante mais cela ne représente que de l'ordre de quelques fractions de centimes par kWhé. Cependant, une étude des documents passés de l'ANDRA montre que ce coût a été multiplié par 3 en une décennie. Il faut donc prendre cette estimation avec beaucoup de prudence, car elle évolue au fur et à mesure que le concept se précise.

Cependant, le coût du stockage géologique pour la collectivité risque de ne pas être limité à cette somme si le stockage est insuffisamment robuste, et qu'il a des effets nocifs sur l'environnement. Il faudrait donc idéalement rechercher un optimum entre une robustesse suffisante de l'installation (qui induit une augmentation du coût initial) et une prise de risque à terme (qui induit une espérance de coût futur). Nous n'avons trouvé nulle part une telle étude qui serait pourtant un instrument de décision fort utile.

III.C. Éléments industriels :

La ventilation dans le temps des choix stratégiques du cycle du combustible

Il faut bien garder à l'esprit que, dans le nucléaire, les choix s'appuient sur des années de travail d'équipes de recherche, la réalisation de prototypes lourds et qu'ils se traduisent in fine par des investissements en dizaines de milliards de Francs.

Les choix effectués se retrouvent ainsi très peu facilement réversibles.

Quels pourraient être les choix pour le cycle du combustible au cours du prochain quart de siècle, sachant que chacun d'eux retroagirait sur le problème des déchets du cycle ?

Afin de broser le paysage, examinons dans un premier temps isolément les types d'évolution que l'on pourrait envisager sur chacune des composantes du cycle.

III.C.1. Les choix possibles de nouveaux combustibles :

Enjeu pour les investissements :

Quelles installations de fabrication du combustible ?

Quelle nouvelle usine d'enrichissement ?

A savoir : quelles technologies retenir pour l'enrichissement isotopique ? faut-il ré enrichir isotopiquement les produits de retraitement des combustibles usés pour assurer la rentabilité économique du multirecyclage ? et faut-il en conséquence un laser de "purge isotopique"(cf III.A.2) ? faut-il construire une usine de fabrication de combustibles à support Uranium enrichi destinés à l'ensemble du parc (les combustibles "MIX" des scénarios de multirecyclage) ?

Choix de cycle concernés :

Quel est l'avenir de la voie de recyclage des actinides :

- Quel avenir pour les MOX ? faut-il faire des MOX deuxième tour, éventuellement par mélange avec du Pu issu de combustibles usés 1er tour ?

- Faut-il passer à des combustibles MIX ?

Sur quelle partie du parc : s'agirait-il seulement de permettre un chargement homogène des coeurs moxés actuels où alternent aujourd'hui éléments MOX et UOX ? Ou le MIX aurait-il vocation à terme à devenir le combustible standard sur toutes les tranches ?

Horizon temporel :

(i) Scénarios de développement du recyclage :

Le combustible MIX et les MOX multirecyclés: dès 2000 :

Bâtir une usine de fabrication de MIX serait avant tout un problème d'ingénierie (gestion des risques de criticité et de la radioprotection des travailleurs) dans une installation en boîte à gants du type de Mélox.

Si une réelle volonté se formait de basculer le cycle sur des chargements MIX en réacteurs ou sur des MOX spéciaux (de multirecyclage), cela nécessiterait des simulations numériques spécifiques de neutronique, mais pour lesquelles les outils existent déjà au CEA et des scénarios types ont été développés; les solutions retenues pourraient par ailleurs être spécifiquement calibrées en fonction des géométries actuelles des réacteurs (il existe d'ailleurs un précédent, aujourd'hui parvenu à maturité industrielle : le MOX).

On pourrait en parallèle procéder rapidement à des ajustements mineurs sur les réacteurs (du type modification des grappes de contrôle, voire changement des couvercles de cuve), pour adapter l'outil de pilotage et les commandes de sûreté - opérations qui s'évaluent en dizaines de millions de Francs seulement -.

En résumé, il n'y aurait pas de véritable barrière technologique à franchir : cette voie pourrait techniquement être lancée dans les toutes prochaines années. Il s'agirait donc d'abord d'un choix stratégique effectué pour des raisons économiques ou environnementales. Une fois la décision prise, la mise en pratique serait simplement conditionnée par le temps de qualification des nouveaux équipements et des nouveaux combustibles (entre 5 et 10 ans si l'on se réfère au cas du MOX ?).

(ii) Scénarios de stagnation des politiques de recyclage :

Un entreposage sans retraitement des MOX usés : de 2000 jusqu'en 2040 ?

La poursuite de l'augmentation des taux de combustion des combustibles UOX ou des MOX premier tour : des processus étalés sur toute la période ?

Pour des raisons de maîtrise de coût, il serait envisageable de ne pas chercher à développer de combustible MIX ou MOX multicycles, et, au contraire, de laisser le plus longtemps possible entreposés les combustibles MOX irradiés, en piscine par exemple.

Si l'on écarte les éventuels effets économiques d'échelles sur des MOX multicycles ou les MIX, en termes de valeur énergétique, il semble en effet plus intéressant de se limiter à une fabrication de MOX premier tour, destinés à un moxage partiel du parc (cf III.A.2 et III.B.). Par ailleurs, aucune contrainte contractuelle dans les relations entre EDF et la COGÉMA dans les dix années à venir, ni d'approvisionnement, ni d'entreposage, ni de retraitement, ne devrait faire obstacle à un entreposage temporaire des MOX usés qui serait alors mené en parallèle de la montée en puissance du MOX premier tour.

En l'absence d'une décision spécifique, la question des MOX usés pourrait en fait ainsi être reportable à l'horizon 2030-2040, et la décision de les retraiter ou non serait alors laissée à l'évolution de la contrainte économique. Par ailleurs, cela assurerait l'avantage d'une séquence de décroissance thermique pour les MOX, sachant que le processus est beaucoup plus lent pour ceux-ci que les combustibles usés premier tour à l'uranium enrichi.

Les choix de nouveaux combustibles pourraient alors s'inscrire dans la poursuite de la politique actuelle d'augmentation des *taux de combustion* des combustibles UOX et MOX premier tour, de 33 à 43 (puis 55?) GWjth/tMLI. Des taux plus élevés assurent aux combustibles un temps de séjour plus long en réacteur et par là une augmentation de la disponibilité des tranches, soit une réduction des coûts d'exploitation. Mais il faut alors réaliser que, techniquement, par la dégradation isotopique et l'accumulation de poisons neutroniques qui en résulte (cf.III.A.2), cette évolution aura (et aurait encore plus si elle devait se poursuivre) l'effet indirect d'handicapper les politiques de retraitement.

III.C.2. Les choix possibles du retraitement :

Enjeux pour les investissements :

Aujourd'hui : la réalisation à Marcoule de deux pilotes de retraitement, Atalante 1 et 2.

Pour l'avenir :

Quelles nouvelles installations à l'usine de La Hague ? Et ce, pour quels combustibles à retraiter ?

A savoir :

Le retraitement pourrait-il être abandonné ?

Si au contraire la politique de retraitement est poursuivie, que sera le cahier des charges d'UP4 :

- Une séparation moins poussée pour des raisons d'économie et, par exemple, compatible avec les capacités de confinement à long terme des verres de fission ?

- Ou, au contraire, si des scénarios de retraitement poussé sont retenus, une cascade d'ateliers supplémentaires de séparation spécifique de certains actinides mineurs et produits de fission à vie longue ?

En tout état de cause, UP4 devrait représenter un investissement d'environ 50 GF.

Choix de cycle concernés :

L'avenir de la politique de recyclage.

- Faut-il aussi retraiter les MOX ?

- Faut-il multirecycliser en réacteur REP ?

Horizon temporel :

(i) Scénario de poursuite du retraitement :

Des ateliers supplémentaires à partir de 2000 à La Hague pour le retraitement poussé ?

La 2ème génération de La Hague (UP4) : à partir de 2020.

En effet, UP3 et UP2-800 ont été mis en service respectivement en 1989 et 1994 pour une durée de vie de 40 ans. Les réflexions sur le besoin d'un successeur à ces usines -et le type de ce successeur - seraient ainsi à engager vers 2020.

Mais, dès 2000, en fonction des avancées des recherches sur la séparation-transmutation, des décisions de construire des ateliers supplémentaires pourraient intervenir.

(ii) Des scénarios d'abandon du retraitement ?

Un scénario d'abandon vers 2010 ?

Si à l'inverse la décision d'abandonner le retraitement en France était prise, conduisant ainsi à un arrêt d'UP2-800 (et peut être d'UP3, compte tenu de l'impact international d'un tel choix) quand pourrait-elle intervenir ?

Un tel scénario reposerait probablement sur la convergence d'un faisceau d'éléments, ainsi :

- un constat de non compétitivité de la voie MOX premier tour par rapport à la voie du cycle ouvert avec stockage direct;

- un refus par la société de l'Usine de La Hague ?

- l'acceptation scientifique et publique de la démonstrabilité du concept de stockage direct;

Ce dernier point pourrait avoir été acquis autour avant 2010.

Le premier contrat de retraitement EDF/COGÉMA sur la période 1990-2000 a assuré le paiement de l'investissement d'UP2-800. Le contrat 2000-2010 devrait couvrir les frais de démantèlement. Autour de 2010 (cf ci-dessous), se joueront par ailleurs les premiers choix de renouvellement du parc de centrales actuel avec des considérations sur la marge de compétitivité requise par le nucléaire.

Une fenêtre de tir pour une décision d'abandon apparaîtrait ainsi en 2010.

III.C.3. Les choix possibles pour les "réacteurs du futur" :

Enjeux pour les nouveaux investissements :

Un enjeu colossal à 600 (?) - 1000 (?) GF étalés sur un quart de siècle, au siècle prochain :

Quelle va être la deuxième génération de réacteurs nucléaires sur le parc ?

Par rapport aux considérations de rentabilité immédiate, quelle sera la prise en compte dans le dimensionnement des nouveaux réacteurs des préoccupations de valorisation énergétique des combustibles et de réduction de l'inventaire radiotoxique ?

Choix de cycle :

- Si l'objectif est de réduire le volume des déchets et de consommer les actinides en réacteur, en particulier le Pu, faudra-t-il au 21ème siècle adopter des géométries spécifiques pour les REP (une architecture "RMA"- Rapport de Modération Accru -) ? faudra-t-il construire des EPR avec option multirecyclage ?

- Faut-il chercher à développer rapidement des *systèmes hybrides*, et dans ces conditions, pourrait-on envisager un passage d'une partie de l'outil industriel (mines, traitement, préparation du combustible, parc, retraitement) sur une filière Thorium à la place de l'Uranium ?

- Faut-il préserver un savoir-faire dans les technologies actuelles à neutrons rapides pour répondre à une éventuelle politique d'incinération des actinides mineurs, voire des produits de fission ?

Horizon temporel :

Le choix d'une deuxième génération de REP : autour de 2010.

Le programme d'équipement de la France en REP, décidé au premier choc pétrolier, a été extrêmement serré avec la quasi-totalité des mises en service concentrées entre 1977 et 1990. Les centrales, initialement conçues pour une utilisation de 25 ans, auront probablement une durée de vie de 40 ans. Depuis la fin des années 80, la consommation d'électricité en France ne progresse plus que de 1 à 2% par an. EDF possède à ce jour une surcapacité en électricité de base d'origine nucléaire (d'où l'exportation d'un dixième de sa production).

Dans ces conditions, une à deux tranches supplémentaires au plus, et ce à des seules fins de maîtrise d'un palier technologique incrémental (en clair : l'EPR), seraient le maximum de ce que l'on pourrait raisonnablement envisager en France sur la décennie 2000-2010.

Compte tenu de la dizaine d'années nécessaire entre des décisions d'engagement de nouveaux paliers nucléaires et la mise en service des premières tranches, cela amènerait alors à l'horizon 2010 pour les véritables choix stratégiques sur la deuxième génération de centrales.

La maturité des systèmes hybrides ou d'autres réacteurs innovants, la possible reconstitution d'une partie du parc en cycle Thorium: vers 2020-2030 ?

L'Amplificateur d'Énergie évoqué en III.A.2.d pourrait devenir un élément de stratégie industrielle si le pilote actuellement en projet en Espagne arrivait à maturité. Compte tenu de l'ensemble des sauts technologiques impliqués, la mise au point ne serait, dans l'hypothèse la plus favorable, sans doute pas acquise avant 2010. La construction d'un incinérateur ou d'une famille de réacteurs à base de systèmes hybrides ne pourrait ainsi être au mieux qu'alors décidée pour une mise en service en 2020, ce qui laisserait, si besoin était, le temps nécessaire au développement d'une filière Thorium spécifique.

Mais cela signifie bien que, en cas de succès technique, ces systèmes pourraient apparaître sur la palette des choix possibles pour le renouvellement du parc français dès le début du lancement de la deuxième génération de réacteurs.

A côté de cette voie des *systèmes hybrides*, aucun autre concept de réacteur (combustibles fluides, céramiques) ne paraît à ce jour avoir atteint une maturité théorique suffisante pour pouvoir déboucher sur une réalisation industrielle avant l'horizon de 2020-2030 ici envisagé.

Un retour aux RNR : 2010 ou pas avant 2030 ?

L'échec industriel de Superphénix a échaudé le public ainsi que les industriels, l'administration qui y ont englouti 50 GF et nourri au sein des groupes de pressions écologistes la volonté d'un arrêt définitif de la centrale. La préparation et le chargement d'un nouveau coeur, opérations coûteuses pour ce qui était devenu une "installation industrielle de recherche", associé aux engagements politiques de la nouvelle majorité parlementaire de Juin 1997, pourraient bien avoir constitué une fenêtre de tir au printemps 1997 pour l'abandon de Superphénix.

Phénix mis de côté (et c'est une installation vieillie avec ses 25 ans de service), il ne resterait alors plus au niveau mondial comme RNR de taille industrielle que le réacteur de Monju au Japon. Dans ces conditions, un redémarrage de la filière RNR sur la base de l'expérience Superphénix (un réacteur de type EFR/CAPRA) paraîtrait sérieusement compromis à moyen terme. Mais la technologie neutrons rapides a des avantages intrinsèques sur les REP (cf III.A.2). Au titre de l'hypothèse intellectuelle, on pourrait ainsi envisager un redémarrage de la filière à l'horizon 2030 qui serait associé à un scénario :

- soit de constitution d'un stock de Plutonium à des fins énergétiques dans une situation de flambée mondiale des prix par pénurie de l'Uranium naturel;
- soit d'incinération de Plutonium après 2 à 3 recyclages, ou de gestion des actinides mineurs.

Le CEA a ainsi travaillé au début des années 90 en partenariat européen sur le développement d'un RNR de deuxième génération, l'EFR, intégrant les enseignements de Superphénix.

Les constantes de temps pourraient néanmoins être sérieusement raccourcies en cas de succès du concept des *systèmes hybrides*.

III.C.4. La possibilité d'un stockage souterrain pour les déchets à vie longue :

Enjeux pour les investissements :

La construction et l'exploitation de plusieurs laboratoires souterrains de caractérisation géologique des sites potentiels, pour un coût total d'une dizaine de GF.

La construction et l'exploitation d'un site de stockage pour un coût total estimé de 75 GF.

Choix de cycle associés :

- Si la démontrabilité de la sûreté du stockage direct est assurée, et si, alors, des considérations économiques défavorables au retraitement prennent le dessus, dans quelle mesure ne cherchera-t-on pas à aller au plus simple, au plus direct, dans la gestion des déchets, c'est-à-dire à pousser l'option du stockage direct ?

- Au contraire, si la contrainte économique finissait par s'avérer de nouveau porteuse sur le long terme pour le nucléaire, dans quelle mesure n'offrirait-elle pas ainsi un cadre favorable à des solutions de multirecyclage en réacteur et donc :

- (i) à la réduction de l'inventaire radiotoxique stocké,
- (ii) au stockage de verres de fission uniquement.

Horizon temporel :

Le verrou de 1997 :

Les travaux de la Mission de Médiation ont débouché sur la candidature de collectivités locales favorables à l'accueil d'un laboratoire souterrain. Sur cette base, des campagnes de reconnaissance géologique ont permis de sélectionner trois sites pour un laboratoire (cf II.C.). Les enquêtes

publiques ont été ouvertes en Mars 1997 et les votes des communes limitrophes sont en cours au moment de l'établissement de ce mémoire. Au vu des premiers votes, très favorables dans leur majorité, la procédure devrait aboutir. Une étape potentiellement bloquante pour l'ensemble du projet serait ainsi franchie.

Le tournant critique de 2006 :

Conformément à la Loi de 91, un rapport sur l'aboutissement des 15 années de recherche sera remis en 2005 à l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, le vote d'une loi sur le stockage définitif de déchets à vie longue devant intervenir au plus tard en 2006. Si la construction d'un site était ainsi autorisée, celui-ci serait alors susceptible d'entrer en service vers 2020.

Mais le débat de 2006 en France pourrait conduire à une palette de scénarios, ainsi :

- (i) Refus d'un site souterrain, par confiance insuffisante en la sûreté du concept, et demande de compléments de recherche;
- (ii) Différemment du choix par constat que les autres voies que le stockage ont été insuffisamment examinées pour qu'il puisse y avoir un véritable choix dans l'acceptation du stockage, et demande de compléments de recherche sur l'ensemble des voies possibles dans l'aval du cycle.
- (iii) Acceptation de la réalisation d'un site mais en conditionnant l'autorisation finale d'ouverture en 2020 à l'aboutissement de recherches du type (i) ou (ii).
- (iv) Acceptation de la réalisation d'un site sous réserve de l'imposition de servitudes sur les déchets qui pourraient y être stockés (par exemple, seulement des verres de fission) ou de servitudes portant sur les déchets produits à compter de 2006 (limites imposées sur le pourcentage maximal autorisé de certains éléments : produits de fission à vie longue, certains actinides mineurs etc.).

Un tel scénario pourrait lier la construction du site au développement de nouveaux outils de retraitement. Ainsi, si les recherches sur le multirecyclage ont débouché sur des scénarios potentiellement opérationnels, et s'il subsiste des incertitudes fortes sur le comportement à long terme des radionucléides dans le stockage, il pourrait être décidé de recycler complètement les actinides à vie longue et de n'autoriser au stockage que le rebut des ateliers de séparation. La décision de 2006 constituerait ainsi une contrainte sur les choix globaux de cycle du combustible avec une rétroaction sur les choix de combustibles et de nouveaux réacteurs.

L'impact de la décision sera alors international :

En effet, les événements de la fin des années 80 avaient bloqué en France le développement d'un stockage souterrain. La loi de 91 a déverrouillé la situation et permis de relancer à un rythme très soutenu la démarche. Dans la même période, les pays étrangers (USA, Suède, GB) perdaient ou voyaient différés à l'infini, par blocage des opposants, référendums ou décisions administratives, les sites qu'ils avaient sélectionnés. La Suisse, la Belgique, le Canada, la Suède possèdent aujourd'hui des laboratoires souterrains, mais qui n'ont pu être acceptés par les populations qu'à la condition qu'ils ne conduiraient jamais à l'ouverture d'un site réel de stockage des déchets.

Avec les laboratoires de l'ANDRA, la France se retrouvera ainsi l'unique possesseur de laboratoires de site destinés à une recherche très soutenue de caractérisation, avec une date, 2006, programmée pour la remise de conclusions.

A l'étranger, la Suède programme l'ouverture d'un premier site pilote pour 2008; aux USA, le Department of Energy, chargé du stockage, de report en report, n'envisage pas une mise en service effective de son site de Yucca Mountain avant 2005.

La France, détentrice du deuxième parc mondial électronucléaire, pourrait ainsi bien être le premier pays au monde à autoriser un site de stockage souterrain au début du siècle prochain. Dans ces conditions, la décision prise en 2006 aura des répercussions très fortes.

L'enjeu, national et international, de la décision sera alors très fort : un refus sans appel signifierait en fait une non-décision sur les déchets en ce qu'elle ne réglerait en rien le cas des déchets déjà existants, et une décision très forte sur le nucléaire en ce qu'elle pourrait condamner à terme l'industrie nucléaire civile :

- Au niveau national, la question des déchets à vie longue resterait en effet en suspens pour tous les verres de fission déjà produits et entreposés à La Hague mais aussi pour les déchets potentiels que seraient les combustibles usés entreposés en piscine. Aucune politique de retraitement, si poussé soit-il, ne serait en mesure de compenser l'inexistence du site, puisque (cf III.A.2.), quel que soit le scénario pris en compte, en se plaçant dans les hypothèses de faisabilité technique les plus optimistes et en évacuant toute obstacle de coûts, il restera toujours un très large pourcentage de déchets à vie longue à gérer. Ne resterait qu'une solution d'entreposage dont on ne serait plus envisager la fin : la question du coût final du cycle se rouvrirait complètement - et ce serait avec une inflation des coûts -.

- L'avenir du nucléaire pourrait ainsi se retrouver dans la balance à quelques années des décisions de renouvellement du parc : en l'absence de tout autre signal politique clair, un refus pourrait en fait programmer un désengagement mécanique de la France du nucléaire par non renouvellement des tranches dans les décennies suivantes.

L'étape de l'ouverture du stockage : 2020

La décisions finales d'autorisation de mise en service du site, vers 2020, préludes au stockage des premiers colis de déchets, constitueront une autre étape potentiellement sensible à franchir. Il y aura eu un recul supplémentaire de 15 années pour les recherches sur les différentes composantes du cycle; la deuxième génération de l'outil industriel nucléaire commencera à entrer en service. Les spécifications des colis de déchets effectivement stockables (passés et surtout futurs) pourraient alors être ajustées : si lieu, que faire des MOX usés entreposés en piscine depuis 1990 ? quelles contraintes sur la composition des déchets futurs ? Ces ajustements pourraient aussi répondre à des attentes publiques de minimisation de l'inventaire radioactif stocké et constitueraient en fait un gage politique supplémentaire accordé à la mise en service du site.

III.C.5 Les rétroactions des programmes de démantèlement des armes nucléaires:

Introduire ici un tel sujet peut paraître surprenant mais il constitue en fait bel et bien une donnée pour le cycle, qui a fait irruption depuis quelques années.

Avec la fin de la guerre froide et les traités de désarmement Start I et II, les États-Unis et la Russie, héritière du potentiel nucléaire de l'URSS, ont entrepris de démanteler une partie de leur armes nucléaires. A l'horizon 2005, chacun des deux pays se retrouvera ainsi à avoir à gérer un stock de Plutonium de démantèlement d'environ 50 t.

Pour donner un ordre de grandeur, le flux des combustibles usés français génère environ 8 t/an de Plutonium de retraitement. Le Plutonium de qualité militaire a des caractéristiques un peu différentes : en particulier, il est particulièrement riche en isotope 239 (plus de 90% en masse, contre environ 60% pour le Plutonium des combustibles UOX usés).

Les États-Unis veulent voir au plus vite ce Plutonium militaire mis sous une forme qui rendrait extrêmement difficile sa reprise pour refabriquer des armes. Ils souhaiteraient qu'une solution définitive puisse aboutir industriellement à l'horizon 2020.

La "National Academy of Sciences" américaine a remis en 1994 une étude examinant les options possibles. Le sujet a fait l'objet d'une réunion spécifique du G7 avec la Russie à la fin de 1996.

Pour bien comprendre l'enjeu, il faut examiner la position de chacun des deux pays :

Les États-Unis défendent une stratégie générale de non-retraitement/recyclage du Plutonium civil, à la fois pour des raisons de coûts et de non-prolifération : l'administration américaine estime en effet que le Plutonium de qualité civile, quoiqu'ayant de très mauvaises caractéristiques explosives, peut servir à la réalisation d'armes terroristes de quelques kilotonnes seulement mais qui auraient des effets contaminants ravageurs, sans parler de l'impact psychologique d'une telle action.

En revanche, les Russes se refusent à gérer leur Plutonium comme un pur déchet et voudraient au contraire utiliser son potentiel énergétique.

La National Academy of Sciences a à ce jour été conduite à promouvoir deux scénarios techniquement réalistes aux échéances de temps considérées :

- L'immobilisation du Plutonium militaire par vitrification selon la technologie classique des verres borosilicatés de l'industrie du retraitement des combustibles usés

(Mais il faudrait développer des formulations spécifiques de verre. Ces verres pourraient être enchâssés dans des matrices de produits de fission pour "protéger par la radioactivité" le Plutonium des "intrus" éventuels. Les verres seraient placés en stockage géologique. Toutes ces opérations seraient réalisées dans un environnement purement militaire).

- L'utilisation du Plutonium militaire comme combustible, par fabrication de MOX. Les "combustibles MOX militaires", une fois usés, (au Plutonium dégradé et pour partie incinéré) seraient ensuite placés en stockage direct dans un site géologique.

La première voie pourrait apporter des enseignements scientifiques complémentaires sur les verres de confinement.

La deuxième voie formerait une brèche dans la doctrine de "non-Moxage" des réacteurs américains et serait susceptible de modifier l'appréciation portée au niveau mondial sur les stratégies de retraitement des actinides. Mais on pourrait aussi envisager que le Plutonium militaire soit utilisé dans des réacteurs hors des États-Unis et de Russie. Compte tenu des quantités considérées, l'industrie du retraitement (en France, au Japon et en Grande-Bretagne) pourrait s'en trouver très fortement perturbée pour une ou deux décennies.

III.C.6. Quelle synthèse envisager aujourd'hui pour ces données stratégiques ?

Le cadre stratégique est porteur de logiques partielles. Ainsi :

(i) Un succès scientifique dans la voie de séparation, un contexte économique favorable à une pérennisation de l'industrie nucléaire, la mise en chantier d'un site de stockage, pousseraient à un cycle avec multirecyclage (du Plutonium seul, ou également de certains *actinides mineurs*), avec ajustement en conséquence des nouveaux réacteurs et stockage de verres sous contrainte de minimisation de l'inventaire isotopique.

Mais aussi :

(ii) Une forte contrainte de compétitivité sur l'industrie nucléaire, l'absence de contrainte d'approvisionnement en combustible, des gains significatifs de coûts avec des combustibles à fort taux de combustion, une démontrabilité acceptable du stockage direct, pourraient conduire à un cycle à un seul passage en réacteur, avec stockage direct des combustibles usés, et à un plafonnement, voire arrêt à terme, de l'activité de retraitement.

Mais il faut bien admettre que coexistent aujourd'hui dans l'ordre des possibles trop de logiques opposées pour que soit possible la définition d'un plan stratégique global.

C'est en fait le modèle d'un "arbre" temporel de décisions possibles qui émerge ... mais pas la notion d' *arbre* que l'on envisagerait a priori en stratégie.

Il s'agit en effet non pas d'un arbre logique, mais plutôt de la notion un peu inattendue d'un *arbre* au sens végétal (cf schémas).

C'est-à-dire :

- un arbre en croissance, progressivement nourri par l'évolution des recherches, de la contrainte économique et des données internationales, y compris militaires;
- un arbre avec un *tronc* qui donne une succession obligée d'étapes :
 - la mise en service attendue d'un site de stockage;
 - les décisions sur le renouvellement du parc électronucléaire;
 - les décisions sur les orientations futures à donner à la politique de retraitement.

- un arbre dont les *branches* , enfin, seraient les scénarios possibles en train d'émerger techniquement et dont un chiffrage économique précis ne deviendra sans doute véritablement accessible qu'à l'horizon 2006.

Au cours du prochain quart de siècle, le franchissement successif par l'ensemble des acteurs de chacune des étapes du *tronc* permettra une résolution par étapes de la question des déchets à vie longue qui s'orientera progressivement selon une ou quelques-unes des *branches* qui auront émergé; et, dans les orientations générales prises seront contenus en germe les réponses aux interrogations industrielles comme l'avenir des combustibles MOX usés entreposés, l'éventuelle construction d'une usine de fabrication du MIX, les choix d'UP4 (le successeur des installations actuelles à La Hague) etc..

La résolution effective pourrait mêler plusieurs voies, par exemple pour des raisons industrielles de gestion de l'outil déjà existant, ou de prudence quant à l'évolution de la contrainte extérieure. Mais les briques en seraient ces scénarios types, plus ou moins modulables, et qui sont aujourd'hui en gestation.

Synthèse industrielle	EDF	COGÉMA	CEA	ANDRA	Éléments techniques Extérieurs	Données Exogènes Possibles
1997		Contrat retraitement EDF 2000-2010 Contrats MOX à l'international	Recherches déchets (verres de fission, stockage direct) Recherches retraitement / multirecyclage	Construction des laboratoires souterrains	Mise en service du WIPP (militaire) aux USA	<i>sans lien chronologique</i>
2000	Sort du MOX usé? Sort UOX 2ème génération ? Construction d'un réacteur avancé (EPR) ?	Usine MOX homogène?	Recherches nouveaux réacteurs ? Recherches nouveaux combustibles ?	Qualification des laboratoires souterrains Rapport préliminaire de Sécurité d'un site de stockage	Pilote Rubbiatron en Espagne ?	Evolution des cours de : pétrole, gaz, U naturel ? Révolution en Algérie ou Russie?
2006			Suite Recherches déchets	Autorisation de construction d'un site de stockage ?	Ouverture de sites de stockage civil aux USA, Suède ou Canada ?	Nouveaux modes de production d'énergie classique?
2010	Début décisions de renouvellement du parc	Réflexion UP4 Séparation poussée? Enrichissement laser?	Suite Recherches retraitement / multirecyclage ?			Antinucléaires au pouvoir en Europe? Taxe sur le CO ₂ ? Autre Tchernobyl ?
2020 2030	Incinération des MOX 2ème tour en neutrons rapides?	Mise en service UP4	??	Ouverture du site pour une 1ère génération de déchets ?	Gestion aux USA du Pu de démantèlement des armes Construction de Rubbiatrons à l'étranger?	Krach financier mondial? Crise climatique?

III.D. Quels peuvent être les éléments d'une éthique de gestion des déchets à vie longue ?

III.D.1 Le besoin ressenti d'un Principe de Responsabilité à l'égard des générations futures :

Comme il a été vu en III.C., les éléments techniques et économiques disponibles en 1997 ne permettent pas de privilégier a priori un scénario par rapport aux autres possibles.

Un premier niveau immédiat d'explication s'impose : le caractère encore très partiel des résultats de recherche. Mais sans doute la situation est-elle en fait encore plus lâche que ce que l'on serait tenté de l'envisager au premier abord : n'aurait-on pas en fait le secret et illusoire espoir de faire dire, à chacune des composantes de la stratégie, des vérités qui soulageraient considérablement les prises de choix si par extraordinaire elles s'avéraient accessibles (mais dont il faut bien comprendre que certaines, sur le fond, ne pourront jamais l'être) ? Précisons cette idée :

- Dans le III.A.1, l'idéal serait de pouvoir asseoir la démonstration de la sûreté d'un site de stockage sur un modèle déterministe tenant de l'équation de la diffusion. Mais il faut par exemple intégrer des sciences de la nature comme la biologie.
- Le III.B.5 met en garde contre la tentation de trop accorder de confiance à de la prévision économique à si long terme.
- Le III.C.5, enfin, a illustré comment des éléments que l'on verrait a priori complètement exogènes, comme les questions de désarmement, et qu'il n'y aurait donc normalement aucune raison de penser à intégrer dans des scénarios, pourraient en fait bien être capables de profondément modifier l'intérêt des scénarios envisageables les uns par rapport aux autres.

Est-ce là la preuve qu'il faudrait se contenter d'un "pilotage à vue" de la question des déchets à vie longue, en renonçant humblement à toute idée de ligne directrice générale ?

Ce serait à l'encontre de tous les efforts qui jusqu'ici ont été déployés dans les différents pays.

Et nous pensons effectivement que, à se laisser ainsi porter par les événements (ce qui serait la traduction concrète du pilotage à vue), il y aurait un réel risque :

L'entreposage en piscine de combustibles usés, l'entreposage à sec de verres de fission, la reprise de colis endommagés, la récupération d'effluents contaminés ou la décontamination de sols, sont, après un demi-siècle de développement de l'industrie nucléaire, des sujets aujourd'hui parfaitement maîtrisés. Aussi, sans rencontrer le moindre point bloquant technique avec les déchets, l'industrie nucléaire pourrait très bien se contenter de ces seuls outils, au cours du prochain demi-siècle, et ce, pour des coûts annuels de "gestion" des déchets somme toute bien marginaux.

Laisserait-on alors aux générations suivantes la charge de supporter par elles-mêmes des coûts annuels supplémentaires de surveillance de nos déchets et, le cas échéant, le coût de développer par elles-mêmes pour ces déchets une solution à caractère définitif, c'est-à-dire sans reprise nécessaire des colis ? Ce serait alors une non-décision se chiffrant en GF de charges supplémentaires cumulées pour les générations à venir : des milliers de tonnes de produits particulièrement toxiques seraient léguées sans que soit proposé la moindre solution définitive pour les gérer, et ceci présupposerait en

fait implicitement une confiance absolue dans les capacités scientifiques et financières des générations futures à venir à bout de la question; le geste serait par ailleurs susceptible d'avoir des répercussions sur des millénaires. Ne serait-ce pas là une preuve d'irresponsabilité totale?

Certes, l'humanité a toujours laissé des charges aux générations futures, consciemment ou inconsciemment. De plus, si l'industrie nucléaire devait se poursuivre aux niveaux actuels dans les prochains siècles, l'établissement d'un bilan charges/bénéfices pour les transferts de nuisances deviendrait particulièrement délicat.

Mais une idée forte, commune d'ailleurs à tous les déchets industriels, est qu'il ne faut pas que le lien se perde entre la production de déchets et leur gestion ultime. Nous proposons de caractériser ceci comme un "Principe de Responsabilité".

Ce que l'on pourrait voir comme des manifestations plus ou moins directes de ce Principe sont effectivement apparues depuis quelques années.

La Loi de 91 pose dans son préambule la Responsabilité à l'égard des générations futures (cf II.B) Par ailleurs, les aspects financiers sur le combustible pourraient avoir été une traduction implicite de ce principe dans la réalité. Ainsi, même si les motivations premières de l'imposition de comptes dédiés à EDF pour les déchets (cf III.B.) et le démantèlement étaient sans doute de l'ordre de la prudence économique, la décision possède une dimension éthique. Il en est de même de l'internalisation dans le coût du kWh d'EDF des coûts estimés de démantèlement des centrales et de gestion des déchets.

Une éthique de gestion des déchets permettrait-elle alors d'appuyer les solutions techniques possibles, voire d'offrir une possibilité de hiérarchisation entre elles ?

L'Agence pour l'Énergie Nucléaire de l'OCDE a ainsi, en Mars 1995, émis un document :

"Opinion collective du Comité de la Gestion des Déchets Radioactifs -

Les Fondements environnementaux et éthiques de l'évacuation des déchets radioactifs à vie longue dans les formations géologiques" (cf annexe 4)

Il y est en particulier souligné que *"l'évacuation définitive nous permet de mieux nous acquitter de nos responsabilités à l'égard des générations futures que des solutions d'entreposage provisoire qui sont synonymes de surveillance et de la transmission de la responsabilité à long terme des déchets aux générations futures, et peuvent, finalement, être négligées par les sociétés de demain dont on ne peut pas présager de la stabilité."*

Pourrait-il ainsi y avoir un jour une Charte Internationale des Droits des Générations Futures ? Pourrait-elle alors poser des lignes directrices universellement admises de tout programme responsable de gestion des déchets et inscrire en fait le Principe de Responsabilité dans les choix stratégiques ?

Mais, dans ces interrogations, peut être deux niveaux de réalité complètement distincts de l'éthique sont-ils en fait mêlés.

III.D.2 Les paradoxes de l'éthique comme outil de décision :

En effet, un principe éthique, s'il peut, s'il doit même, inspirer une politique, n'a pas nécessairement une traduction absolue dans le réel.

La Responsabilité comme notion absolue ne se heurte-t-elle pas en fait immédiatement à la sélectivité des perceptions collectives ? Est-il ainsi légitime pour l'opinion de se concentrer beaucoup plus sur les risques présentés par les déchets nucléaires que par ceux que peuvent présenter la gestion des déchets classiques - Ainsi, existe-t-il vraiment un souci collectif de savoir ce que les décharges de classe I (pour les déchets industriels spéciaux) seront devenues dans quelques siècles ?

En outre, une réflexion éthique pratique peut-elle véritablement accéder au statut d'objectivité? Les rapports entre opérateurs industriels et associations militantes écologistes poussent tout particulièrement à la réflexion :

Au sein même de l'industrie nucléaire française, les deux opérateurs industriels, EDF et la COGÉMA, se prétendent tout autant l'un que l'autre soucieux de l'environnement et des générations futures. Mais cela n'en empêche pas moins leur discours sur la question des déchets de pouvoir largement diverger (cf II.C), et ce, d'une manière parfaitement légitime, compte tenu des missions spécifiques que peuvent avoir un producteur d'électricité et une industrie de retraitement. Par ailleurs, le discours respectifs de ces deux industriels recueille-t-il un assentiment unanime du public ?

Tous les Français respectueux de l'environnement sont-ils véritablement convaincus que le nucléaire est, en puissance, une alternative "verte" de production d'électricité, par son absence d'émissions de gaz à effet de serre ?

Faudrait-il par ailleurs, pousser des solutions de multirecyclage au nom d'une minimisation du risque à long terme sur le stockage ? Mais comment la population pourrait-elle recevoir un discours qui promouvrait une usine de combustibles MIX comme un scénario écologiste ... quand on sait que l'usine de La Hague reste un sujet aussi polémique (comme en témoigne par exemple "Le Monde" du 17/04/97 dans son enquête : "La Hague est-elle mortelle ?") ?

Reprenons comme un cas limite la démarche volontairement internationale, consensuelle, de l'AEN vue en III.D.1 sur la question du stockage : compte tenu de la mission de l'AEN de promouvoir le nucléaire, le message éthique est-il véritablement sûr d'être accepté par tous sans être suspecté de défendre des intérêts particuliers ?

Enfin, certaines associations antinucléaires, tout en se réclamant de la même notion de “Responsabilité” que les industriels et les pouvoirs publics, mais invoquant, elles, un souci aigu de la “Nature”, en viennent à promouvoir des solutions radicalement distinctes pour les déchets : ainsi, afin de préserver le sous-sol de toute contamination “indue”, l’entreposage ad vitam aeternam des combustibles usés en piscine réacteur, associé à une surveillance humaine constante. Faut-il taxer ces attitudes d’ “irrationalité” ?

Mais les arguments du “Progrès Scientifique” et de la “Technique” sont-ils objectivement plus légitimes dans notre société que la défense d’une “Nature” non scientifique ? Disons qu’en 1997 une partie du public des pays nucléaires en est, pour le moins, loin d’être convaincu. Il y a là en fait, sur le fond, deux discours qui participent de registres parfaitement distincts et ne sont par là philosophiquement pas opposables directement.

Nous pensons qu’il est incontournable de “penser” une éthique pour les déchets à vie longue. Mais nous estimons aussi qu’il convient de faire particulièrement attention aux usages possibles du concept d’éthique.

Certains pourraient être tenté d’asservir l’éthique aux lobbyings de toute nature.

De plus, ne se reposer que sur l’éthique pour prendre des décisions concrètes reviendrait alors à faire de la question des déchets un pur problème de société. Il y aurait de très forts risques de dérapage sans le moindre garde-fou où chacun se sentirait légitimé à tout dire sur ce qu’il ne connaît que très mal voire ne connaît pas du tout.

Cela desservirait l’idée d’un Principe de Responsabilité.

Mais il serait tout aussi dommageable d’en rester là pour l’inscription dans la réalité de notre Principe de Responsabilité.

III.E. La légitimation des décisions :

III.E.1. Les choix de société :

Il est extrêmement délicat de concevoir comment pourraient évoluer les perceptions de la société à l’égard des questions nucléaires dans les décennies à venir.

Certains éléments du cycle du combustible pourraient-ils ainsi devenir l’enjeu d’un débat de société ? Où y aurait-il aussi les retombées d’un débat plus général européen : rappelons en effet que l’Union Européenne présente la caractéristique d’avoir la majorité de ses membres non-nucléaires ou anti-nucléaires.

On pourrait ainsi imaginer que la politique de retraitement et de “moxage” devienne un enjeu électoral direct, ou indirect à travers une mise en cause de La Hague.

Un arrêt de La Hague pour raisons politiques ne laisserait alors plus la possibilité qu’une gestion en cycle ouvert avec stockage direct.

Qu'advierait-il par ailleurs des perceptions du risque nucléaire, si demain, un autre accident industriel dans le nucléaire civil, de l'ampleur de celui de Tchernobyl, venait à survenir sur la planète ? Ne serait-ce pas une condamnation à très court terme de l'industrie dans son ensemble au niveau mondial ? Qu'advierait-il alors des projets de stockage : apparaîtraient-ils à leur tour comme une folie scientifique sans appel et n'opterait-on alors pas pour un pur entreposage "perpétuel" sur des sites de surface surveillés ?

Pourtant, pour nous, laisser les craintes légitimes de la société parvenir à bloquer complètement la question des déchets deviendrait in fine une preuve de non-responsabilité collective.

Mais il serait tout également non-responsable de la part des pouvoirs publics de revouloir passer en force des solutions. Ce serait d'ailleurs désormais impossible dans la société actuelle.

Ainsi, à la lumière des expériences de tous les pays nucléaires, nous pensons que, désormais, des décisions sur les stockages géologiques ne pourront être prises que si elles sont vécues comme légitimes par les populations, au sens où il se sera agi d'un *choix voulu* et non d'un *choix subi*.

Ces considérations sont sans doute à élargir à l'ensemble de l'aval du cycle, tant ses composantes se retrouvent désormais liées via la technique et leur prise en compte commune par la Loi de 91.

C'est-à-dire qu'il faut que les citoyens constatent un effort réel de l'industrie nucléaire et du pouvoir politique de les associer à un véritable processus de décision, qu'ils aient le sentiment d'avoir accès à tous les paramètres des décideurs (comme l'évaluation des risques), et, qu'en tout cas ils puissent s'approprier le projet à travers une communication suffisante et une concertation ouverte.

III.E.2. De l'éthique des déchets à un traitement légitime de la question des déchets:

Appliquer aujourd'hui un Principe de Responsabilité à l'égard de la société

Peut être une application concrète fondamentale de l'éthique sur les déchets réside-t-elle là : comme un cadre, le respect d'une démarche de dialogue et d'ouverture pour parvenir à réaliser plus modestement un consensus "de bon sens" entre les scientifiques, les industriels et les citoyens, où chacun doit accepter de prendre en compte les positions des autres :

Prenons-en comme exemple la demande de réversibilité des collectivités locales pour les sites de stockage, qui est aujourd'hui prise particulièrement prise au sérieux par l'ANDRA. En effet, l'Agence sent qu'il y a là un élément qui a pu contribuer à débloquer la situation en 91, et qui le jour de la mise en service du stockage venu, pourrait être la clé de l'acceptabilité du projet.

Mais il s'agit aussi d'affiner le sens concret à donner aux notions non immédiatement juridiques de "concertation", "consultation", développées par la Loi de 91 et ses décrets d'applications : quelles structures "légitimes" pour quelles populations "légitimes" sur chaque sujet, quels modes "légitimes" d'expression de la volonté de chaque acteur ? La Mission de Médiation en a fourni un premier exemple couronné de succès mais qui, en a certain sens, a dû inventer lui-même sa formule d'action. Faudrait-il institutionnaliser l'expérience ?

Des Commissions Locales d'Information et de Suivi ont par ailleurs été mises en place.

De plus, la volonté d'asseoir les démonstrations sur un consensus scientifique international, de réunir les points de vue des différents pays sur la question des déchets, qui inspire des organismes transnationaux comme l'AEN paraît une autre évolution très favorable. Un projet qui serait passé au filtre d'une instance scientifique internationale et aurait reçu un satisfecit, en retirait très vraisemblablement un bénéfice moral allant bien au-delà de la seule sphère scientifique.

Tous ces éléments ont une réalité politique immédiate, bien sûr; mais nous pensons que celle-ci ne peut jouer si elle ne se double pas immédiatement d'un réel sens éthique et vécu comme tel par tous.

En plus des principes éthiques généraux, il y aurait ainsi une éthique concrète, politique, mais au sens noble du terme, qui "ne dirait rien" sur les choix pour les déchets à vie longue mais qui offrirait un code de conduite pour aboutir dans les meilleures conditions aux choix.

Conclusion générale

Compte tenu des échelles de temps mises en jeu, seule une approche graduelle est possible. Il est nécessaire d'assurer sa cohérence. L'objectif est donc de se doter au plus vite d'un savoir-faire opérationnel sur tous les outils raisonnables, tant en termes scientifiques qu'en termes de coûts.

Mais cela impose une veille permanente de tous les éléments nouveaux qui pourraient surgir et être susceptibles de remettre en cause les priorités de recherche. Cela impose aussi de vérifier qu'aucune impasse n'apparaît dans le futur comme conséquence de choix présents.

Il nous semble par ailleurs fondamental d'éviter tout risque de blocage de l'industrie nucléaire. Et, pour ce faire, il faut se donner une garantie à moyen terme en passant le cap de l'acceptation des stockages géologiques, c'est-à-dire, concrètement, en commençant effectivement à en construire un en France, des limitations techniques aux déchets à enfouir étant imposées par une loi.

L'épisode du moratoire Rocard sur les recherches de l'ANDRA et les structures, qui, dans les années qui ont suivi, se sont mises en place, ont définitivement montré que le sujet des déchets à vie longue ne pourrait aboutir sur le terrain que si les acteurs industriels, administratifs et politiques étaient prêts à une réelle démocratisation des décisions et une transparence des informations.

La création d'un site ne pourra être qu'un choix voulu collectivement par les scientifiques, les industriels, le pouvoir politique et les populations, chacun ayant apporté à la décision sa sensibilité et sa contribution propres :

- La décision devra très solidement se fonder sur les avancées de la recherche qui auront permis de préciser la Sûreté du concept de stockage, mais qui auront ainsi montré les potentialités que pouvaient offrir d'autres voies en termes de réduction de la nocivité des déchets à vie longue.
- Il faudra, pour appuyer le choix, bien mettre en perspective les risques pris par les populations du fait d'un site avec ceux liés aux autres déchets et aux autres sources d'énergie.

Compte tenu du long délai de construction du stockage, on pourra par ailleurs continuer les recherches sur l'incinération des déchets en réacteur.

Au moment de la décision d'ouverture du stockage, on pourra alors ajuster les choix en ayant exploré complètement la voie de l'incinération.

ANNEXES

Annexe scientifique et technique

Concepts de physique des réacteurs nucléaires et de radioprotection

Calculs sommaires de dimensionnement du problème des déchets à vie longue

Réactions nucléaires en réacteur :

La distinction fondamentale entre actinides et produits de fission .

La physique des réacteurs nucléaires est fondée sur la neutronique, à savoir l'étude des flux de neutrons en interaction avec les noyaux atomiques présents au sein des réacteurs.

Lors du choc d'un neutron avec un noyau, il y a possibilité de diffusion ou d'absorption.

Lorsqu'un neutron est absorbé, deux réactions sont possibles :

- Une *capture* définitive du neutron par le noyau. Le noyau change alors de nature isotopique; par une succession ultérieure de *désintégrations spontanées* (cf ci-dessous), il peut ensuite changer de nature chimique. On parle de *transmutation* du noyau.

(exemple très fréquent à partir des combustibles UOX : la transmutation de ^{238}U en ^{239}Pu)

- Une *fission* du noyau, id est son éclatement en deux noyaux plus petits. La possibilité d'une telle réaction suppose un rapport favorable des défauts de masse (l'énergie de liaison des nucléons (protons et neutrons)) entre le noyau initial et les noyaux issus de la fission, la différence de défaut de masse étant convertie en de très importantes quantités d'énergie au cours de la fission (équation $dE = dmC^2$).

Seuls les plus gros noyaux de la classification périodique des éléments chimiques sont dans cette situation. Par ailleurs, pour des raisons de stabilité, ces noyaux possèdent un sensible excès de neutrons par rapport aux protons, et ce, de façon proportionnellement plus marquée que pour les noyaux résultants de la fission : une fission s'accompagne ainsi de l'émission d'un ou plusieurs neutrons et c'est précisément cela qui rend possible une réaction en chaîne neutronique.

De tels noyaux sont dits *fissiles*; il s'agit d'éléments naturels comme le Thorium, l'Uranium, ou d'éléments artificiels obtenus par transmutation, dont le principal (en terme de quantités effectivement produites) est de très loin le Plutonium; ces éléments, naturels ou artificiels, sont les *actinides*; les actinides artificiels sont appelés *transuraniens*; les autres transuraniens que le Plutonium sont appelés *actinides mineurs*.

Par leur caractère fissile, les actinides ont potentiellement une valeur énergétique. Mais tous les actinides et tous les isotopes des actinides n'ont pas le même rendement en fission (en terme de

réactivité et d'énergie dégagée), et celui-ci dépend du type de réacteur utilisé. En particulier, les isotopes pairs sont très difficilement fissiles dans des réacteurs à *neutrons thermalisés* ("ralentis") comme les REP et c'est pour cela que l'on cherche à réaliser au préalable un enrichissement de l'isotope 235 par rapport à l'isotope 238 dans les combustibles à l'Uranium.

Les noyaux issus de la fission sont appelés *produits de fission* (exemple : ^{129}I ou ^{99}Tc). Compte tenu de leur masse, ces produits de fission ne sont plus eux-mêmes fissiles; il ne peuvent être à la rigueur que transmutables en réacteur. Il faut ainsi voir les produits de fission comme de véritables "résidus d'incinération" des réactions nucléaires, ce qui leur donne un statut complètement différent de celui des actinides.

Énergie issue des réactions de fission

& Données sommaires sur la composition des combustibles usés :

Énergie de fission	MeV/fission (i)	MWjth/gmatière fissionnée
^{235}U	200	0.948
^{238}U	205	0.960
^{239}Pu	210	0.980
^{241}Pu	212	0.981

Sources : (i) US National Academy of Sciences / M.&D. of excess weapons
(ii) J.Bussac, P.Reuss / Traité de neutronique

MWjth = Mégawattjoule thermique, unité énergétique industrielle

Règle de conversion : 1 MeV/fission eq. $1.6\text{E}-19 * 6.02\text{E}23 / (A+Z) / 86400$ MWjth/gmatière fissionnée

D'où l'ordre de grandeur : 1g de matière fissile représente un potentiel de 0.95 MWjth.

Un combustible ne peut donc avoir que des *taux de combustion* inférieurs à 1 000 GWjth/tMLI (tMLI = tonne de Métal Lourd Initial). Cette limite supérieure correspondrait au cas hypothétique d'un combustible entièrement fissionable en réacteurs; les combustibles actuels en sont très loin (entre 30 et 40 GWjth/tMLI pour les Réacteurs à Eau Pressurisée); les lois de la physique avec transmutations, créations de poisons neutroniques pourraient bien rendre cette limite à jamais inaccessible.

La fission d'1% de la masse de métal lourd initialement présente, c'est-à-dire la formation d'environ 1% de produits de fission dans le combustible irradié, correspond donc approximativement à un *taux de combustion* de 10 GWjth/tMLI.

Pour un combustible UOX, un taux de combustion de 43 GWjth/tMLI (correspondant à un enrichissement de 3,70% en ^{235}U) se traduit ainsi par la formation de :

- environ 4% de produits de fission dans la masse de métal lourd initial.

Il faut y ajouter la formation par transmutation de :

- environ 1% de Plutonium;

- moins de 0,25% d'Actinides mineurs;

Le taux d'enrichissement en ^{235}U est tombé à moins de 1% dans le combustible déchargé.

Le 94% restants de la masse de métal lourd initial sont le support d' ^{238}U .

Les combustibles MOX 1^{er} tour chargés en 1997 ont une teneur de 5,30% en Pu pour un taux de combustion de 35 GWjth/tMLI. L'objectif d'EDF est de passer en 2000 à 7.08% en Pu (équivalent à un enrichissement de 3,70% en ^{235}U et donc un taux de combustion de 43 GWjth/tMLI).

Un combustible MOX 1^{er} tour à 43 GWjth/tMLI serait :

- producteur d'environ 4% de produits de fission dans la masse de métal lourd irradié (cf ci-dessus);
- incinérateur de Pu pour 1 à 2% de la masse de métal lourd initial;
- producteur de moins de 0,50% d'Actinides mineurs.

Notions de décroissance radioactive et de radiotoxicité :

En l'absence de flux de neutrons, un combustible nucléaire conserve une activité spontanée : par des réactions nucléaires internes, les noyaux connaissent des *désintégrations spontanées* - selon des lois probabilistes de décroissance exponentielle du stock de noyaux encore intacts -.

On appelle *activité* d'une source le nombre de désintégration par secondes. L'activité se mesure en Becquerels (Bq).

On appelle *temps de demi-vie* le temps nécessaire à la désintégration de la moitié du stock de noyaux initialement présents.

On ne peut ainsi par construction avoir des substances à la fois à vie longue et à très forte activité. Les substances radioactives à vie courte (quelques dizaines d'années) sont très actives; mais sur d'aussi courtes échelles de temps, il est possible de les confiner sans véritables incertitudes; à l'inverse, une substance radioactive à demi-vie de quelques milliards d'années comme ^{238}U a une activité très faible.

Le problème vient en fait de substances à période "intermédiaire" comme ^{239}Pu avec un temps de demi-vie de 24 000 ans ou ^{129}I avec un temps de demi-vie de 20 millions d'années.

Mais, si l'activité massique d'une substance radioactive est déjà qualitativement un bon indicateur de toxicité, il faut en fait affiner avec les rayonnements émis.

Les désintégrations se traduisent par l'émission d'un petit nombre de particules, qui entraînent des quantités d'énergie très distinctes :

(i) Désintégration alpha : émission d'un noyau d'hélium ionisé.

Un rayonnement alpha extérieur à l'organisme est arrêtable par seulement 35 microns de peau humaine (épaisseur de la peau : 70 microns). Il est ainsi possible de s'en protéger en travaillant en boîte à gants

Les particules alphas deviennent en revanche particulièrement toxiques si l'émetteur alpha est absorbé par l'organisme (phénomène de *contamination interne*; exemple caractéristique : ^{239}Pu).

(ii) Désintégrations beta : émission d'un électron ou d'un positron.

Les rayonnements beta sont arrêtables par des feuilles de métal mais celles-ci deviennent alors des émetteurs gamma (exemple de tels émetteur : l'Amercium ou ^{129}I).

(iii) Émissions gamma

Sauf cas de faible concentration ou d'activité faible, les émetteurs beta et gamma ne peuvent être manipulés qu'en cellule blindée.

(iv) Emission de neutrons : il s'agit des rayonnements les plus pénétrants.

L'énergie des rayonnements émis par désintégration est mesurée en Grays (Gy).

Des facteurs de correction sont appliqués aux différents types de rayonnements pour définir une unité (le Sievert Sv) de mesure biologique des dégâts des rayonnements sur l'organisme humain.

Des rayonnements très violents sont mortels en quelques heures. A un niveau moindre, ils peuvent rester fatals dans le mois qui suit l'irradiation, par excès de destruction de l'ADN et non réplication cellulaire. A dose moyenne, les effets sont différés dans le temps et deviennent stochastiques : risque de développement de cancers, voire risque de mutations génétiques irréversibles.

Les survivants des bombardements d'Hiroshima et Nagasaki ainsi que les victimes de Tchernobyl ont constitué pour leur malheur les deux principales sources d'information sur les effets de fortes doses de radiation sur l'homme. Des seuils maximum d'exposition avec une normalisation internationale en ont été tirés pour les travailleurs de l'industrie nucléaire.

En revanche, les effets réels d'une exposition aux faibles doses de radioactivité restent mal connus (sont ici concernés l'impact des examens radiographiques médicaux, ou, à des niveaux beaucoup plus faibles, les rejets radioactifs autorisés pour les centrales nucléaires mais aussi l'exposition au radon naturel dans les régions granitiques, voire à l'intérieur de maisons en granit). Il faudrait des études épidémiologiques extrêmement serrées et exhaustives sur le sujet, couvrant de larges périodes de temps et définissant parfaitement les situations de référence pour les comparaisons. Mais ceci fait parfaitement défaut à ce jour.

Les effets des faibles doses sont ainsi, par défaut, estimés par extrapolation. Mais une extrapolation doit-elle être linéaire ? Peut-il apparaître des effets de seuil ?

Un homme absorbe environ 3 mSv/an dont 2 mSv/an en moyenne par la radioactivité naturelle (mais cela peut significativement varier d'une région à l'autre en France) et 1 mSv/an du fait de la médecine.

La CIPR, de façon conservatrice, propose pour les effets des faibles doses les extrapolations linéaires suivantes :

- Augmentation de la probabilité pour un homme de développer un cancer en fonction de la dose cumulée absorbée :

$$dp/dD = 0,05 / \text{Sv}$$

- Augmentation de la probabilité de formation chez l'homme de dommages génétiques irréversibles en fonction de la dose cumulée absorbée :

$$dp/dD = 0,01 / Sv.$$

L'objectif de confinement radiologique pour un stockage :

Hors scénarios d'intrusion, la RFS III-2-f a fixé pour seuil d'admissibilité d'un site de stockage un retour à l'homme des radionucléides inférieur à 0,25 mSv/homme.an pendant toute la durée d'activité des déchets stockés.

Pour donner un ordre de grandeur :

- au sens des données de la CIPR,
- du fait de ces 0,025 mSv/homme.an supplémentaires,
- pour seulement commencer à sortir des fluctuations statistiques en termes d'apparition de cancers, il faudrait étudier autour d'un site de stockage une population de plusieurs centaines de milliers de personnes sur l'échelle de temps du siècle.

Un ordre de grandeur pour l'aval du cycle :

Flux annuel de combustibles usés en France à l'horizon 1997-2006

Puissance REP installée : 62.4 GWe

Rendement électrique/thermique moyen des centrales : 33%

Disponibilité du parc : 80%

Facteur de charge : 90%

=> Production annuelle d'électricité nucléaire en France : $62.4E9 * 365 * 0.8 * 0.9 / 0.33 = 50 \text{ TWjth}$

Taux de combustion moyen des combustibles chargés à l'horizon 1997-2006 : 43 GWjth/tMLI

=> *Besoin de recharge annuel : $50E12 / 43E9 = 1200 \text{ tMLI}$*

Annexe 2

Calculs économiques

Nous présentons ici les chiffres qui sont à la base des calculs effectués dans la partie III-B. Les tableaux des pages suivantes donnent la décomposition des coûts.

Nous sommes bien conscients du caractère artisanal de ces calculs mais nous espérons qu'ils donnent des ordres de grandeurs réalistes.

1. Amont du cycle

1.1. Combustibles UOX enrichi à 4,5% en ^{235}U et 55000 Gwj/t ML¹

Capacité énergétique du combustible en utilisation standard : 315 000 kWhé / kg ML²

Cours de l'Uranium Naturel : 300 F/kg Unat³

Coût de la conversion en UF₆ de l'Uranium Naturel : 450 F/kg Unat

Teneur de l'Uranium Naturel en ^{235}U : 0,7 %

Coût de l'enrichissement : 650 F / UTS⁴ 2

Nombre d'UTS nécessaires : 6,8 UTS/kg Unat⁵

Masse d'Uranium naturel pour un kilogramme de métal lourd : 9,0 kg Unat/kg ML³

Coût de production du combustible : 1600 F/kg ML⁶

1.2. Combustibles MOX premier tour

7% Plutonium, 93% Uranium Naturel.

On produit 1 combustible MOX pour 7 UOX usés.

Coût de production du combustible : 6500 F/kg ML⁷

1.3. Combustibles MOX deuxième tour

10% Plutonium, 90% Uranium Naturel.

On produit 1 combustible MOX deuxième tour pour 2 MOX premier tour.

Le coût de production du combustible est pris égal à celui du MOX premier tour.

La capacité énergétique de ce combustible a été prise égale à 200000 kWhé/kg ML pour tenir compte de la dégradation isotopique du combustible.

¹ ML = métal lourd

² source EDF

³ source COGEMA

⁴ UTS = unité mesurant le travail d'enrichissement

⁵ source National Academy of Science

⁶ source COGEMA et CERN

⁷ source COGEMA- MELOX

1.3. Combustibles MIX

Le combustible MIX comprend 2% de Plutonium et de l'Uranium enrichi à 3,8% de ^{235}U pour obtenir la même capacité énergétique et le même taux de combustion que le combustible UOX.

On produit 2,5 combustibles MIX pour 1 combustible MOX utilisé.

Le coût de production du combustible a été calculé en extrapolant du coût de production actuel du combustible MOX et en tenant compte d'un effet d'échelle : lorsque la capacité de production est multipliée par 2, le coût global de production est multiplié par 1,5³.

L'usine Melox produit 150 t/an, on produirait 300 t/an de combustible MIX-direct. On trouve un coût de production de 4900 F/kg ML.

Dans le cas de la production d'un combustible MIX homogène asymptotique, la production de 1200 t/an donne un coût de 3700 F/kg ML.

2. Aval du cycle

2.1. Transport du combustible utilisé

Coût de 300 F/kg ML¹

2.2. Retraitement

Coût du retraitement à La Hague 3600 F/kg ML²

Ce coût comprend l'entreposage pendant quelques années, le conditionnement des verres de fission.

2.3. Entreposage de longue durée

Coût de l'entreposage 920 F/kg ML¹⁰

2.4. Stockage géologique

Nous avons considéré un coût au m³ stocké, qui semble être un indicateur pertinent pour ce type de réalisation. Les projections actuelles donnent un coût de l'ordre de 1 MF/m³². Un stockage direct représente un volume de 2 m³/t ML² ; le stockage des verres et autres déchets issus du retraitement représente un volume de 0,45 m³/t ML². Le stockage direct de combustible irradié demande de plus un conteneur spécial coûtant environ 740 F/kg ML³ pour les combustibles UOX et environ deux fois plus pour les combustibles MOX (problème d'émission de chaleur donc de moindre remplissage des conteneurs).

3. Moyennes

Nous avons moyenné les coûts de chaque scénario en prenant les ratios suivants :

pour 1 combustible MOX, utilisation de 7 combustibles UOX.

pour 1 combustible MOX deuxième tour, utilisation de 2 combustibles MOX premier tour.

¹ source OCDE

² source ANDRA

³ source groupe de travail CEA-ANDRA-EDF-COGEMA sur le stockage direct

pour 2,5 combustibles MIX, utilisation de 1 combustibles MOX.

Cela nous donne pour les différents scénarios :

- UOX : 100% UOX
- UOX + 1 MOX : 87,5% UOX et 12,5% MOX.
- UOX + 2 MOX : 82,4% UOX, 11,8% MOX-1 et 5,9% MOX-2.
- MIX-direct : 66,7% UOX, 9,5% MOX et 23,8% MIX.
- MIX-asymptotique : 100% MIX.

4. Récapitulation des coûts pour chaque combustible

Les coûts montrés dans le tableau suivant sont discutables car l'attribution du coût du retraitement au combustible utilisé ou au combustible produit avec le Plutonium issu du retraitement est délicate. C'est pour cela qu'il vaut mieux considérer le coût agrégé moyenné du cycle global, comme cela a été fait dans le texte du mémoire.

Coûts des différents combustibles

	UOX-direct	UOX-retrait	MOX-1 direct	MOX-1 retrait	MOX-2 direct	MIX direct
potentiel énergétique kWh/kg ML	315000	315000	315000	315000	200000	315000
Matière première Unat F/kg ML	3200	3200	300	300	300	2400
Enrichissement U F/kg ML	4400	4400	0	0	0	3100
Fabrication combustible F/kg ML	1600	1600	6500	6500	6500	4800
Transport combustible irradié F/kg ML	300	300	300	300	300	300
Retraitement F/kg ML	0	3800	0	3800	0	0
Entreposage F/kg ML	920	300	920	300	920	920
Conteneur final C.I. F/kg ML	740	0	1480	0	1480	1480
Stockage géologique F/kg ML	2000	350	4000	350	4000	4000
Matière première Unat cF/kWhé	1,02	1,02	0,10	0,10	0,15	0,76
Enrichissement U cF/kWhé	1,40	1,40	0,0	0,0	0,0	0,98
Fabrication combustible cF/kWhé	0,51	0,51	2,06	2,06	3,25	1,52
Transport combustible irradié cF/kWhé	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15	0,10
Retraitement cF/kWhé	0,0	1,21	0,0	1,21	0,0	0,0
Entreposage cF/kWhé	0,29	0,10	0,29	0,10	0,46	0,29
Conteneur final C.I. cF/kWhé	0,23	0,00	0,47	0,00	0,74	0,47
Stockage géologique cF/kWhé	0,63	0,11	1,27	0,11	2,00	1,27
Coût total cF/kWhé	4,18	4,43	4,29	3,67	6,75	5,40

Annexe 3

Assemblée Nationale

**Loi n°91-1381 du 30 Décembre 1991
relative
aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs**

**LOI n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative
aux recherches sur la gestion des déchets
radioactifs (1)**

NOR : INDX9100071L

L'Assemblée nationale et le Sénat ont adopté,

Le Président de la République promulgue la loi dont la teneur suit :

Art. 1^{er}. - La gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue doit être assurée dans le respect de la protection de la nature, de l'environnement et de la santé, en prenant en considération les droits des générations futures.

Art. 2. - Il est inséré, après l'article 3 de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement, un article 3-1 ainsi rédigé :

« Art. 3-1. - Le stockage souterrain en couches géologiques profondes de produits dangereux, de quelque nature qu'ils soient, est soumis à autorisation administrative. Cette autorisation ne peut être accordée ou prolongée que pour une durée limitée et peut en conséquence prévoir les conditions de réversibilité du stockage. Les produits doivent être retirés à l'expiration de l'autorisation.

« Les conditions et garanties selon lesquelles certaines autorisations peuvent être accordées ou prolongées pour une durée illimitée, par dérogation aux dispositions de l'alinéa précédent, seront définies dans une loi ultérieure. »

Art. 3. - Le stockage en France de déchets radioactifs importés, même si leur retraitement a été effectué sur le territoire national, est interdit au-delà des délais techniques imposés par le retraitement.

Art. 4. - Le Gouvernement adresse chaque année au Parlement un rapport faisant état de l'avancement des recherches sur la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue et des travaux qui sont menés simultanément pour :

- la recherche de solutions permettant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans ces déchets ;
- l'étude des possibilités de stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains ;
- l'étude de procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface de ces déchets.

Ce rapport fait également état des recherches et des réalisations effectuées à l'étranger.

A l'issue d'une période qui ne pourra excéder quinze ans à compter de la promulgation de la présente loi, le Gouvernement adressera au Parlement un rapport global d'évaluation de ces recherches accompagné d'un projet de loi autorisant, le cas échéant, la création d'un centre de stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue et fixant le régime des servitudes et des sujétions afférentes à ce centre.

Le Parlement saisit de ces rapports l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.

Ces rapports sont rendus publics.

Ils sont établis par une commission nationale d'évaluation, composée de :

- six personnalités qualifiées, dont au moins deux experts internationaux, désignées, à parité, par l'Assemblée nationale et par le Sénat, sur proposition de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques ;
- deux personnalités qualifiées désignées par le Gouvernement, sur proposition du Conseil supérieur de la sûreté et de l'information nucléaires ;
- quatre experts scientifiques désignés par le Gouvernement, sur proposition de l'Académie des sciences.

Art. 5. - Les conditions dans lesquelles sont mis en place et exploités les laboratoires souterrains destinés à étudier les formations géologiques profondes où seraient susceptibles d'être stockés ou entreposés les déchets radioactifs à haute activité et à vie longue sont déterminées par les articles 6 à 12 ci-dessous.

Art. 6. - Tout projet d'installation d'un laboratoire souterrain donne lieu, avant tout engagement des travaux de recherche préliminaires, à une concertation avec les élus et les populations des sites concernés, dans des conditions fixées par décret.

Art. 7. - Les travaux de recherche préalables à l'installation des laboratoires sont exécutés dans les conditions prévues par la loi du 29 décembre 1892 sur les dommages causés à la propriété privée par l'exécution des travaux publics.

• Art. 8. - Sans préjudice de l'application de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement, l'installation et l'exploitation d'un laboratoire souterrain sont subordonnées à une autorisation accordée par décret en Conseil d'Etat, après étude d'impact, avis des conseils municipaux, des conseils généraux et des conseils régionaux intéressés et après enquête publique organisée selon les modalités prévues par la loi n° 83-630 du 12 juillet 1983 relative à la démocratisation des enquêtes publiques et à la protection de l'environnement.

Cette autorisation est assortie d'un cahier des charges.

Le demandeur d'une telle autorisation doit posséder les capacités techniques et financières nécessaires pour mener à bien de telles opérations.

Art. 9. - L'autorisation confère à son titulaire, à l'intérieur d'un périmètre défini par le décret constitutif, le droit exclusif de procéder à des travaux en surface et en sous-sol et celui de disposer des matériaux extraits à l'occasion de ces travaux.

Les propriétaires des terrains situés à l'intérieur de ce périmètre sont indemnisés soit par accord amiable avec le titulaire de l'autorisation, soit comme en matière d'expropriation.

Il peut être procédé, au profit du titulaire de l'autorisation, à l'expropriation pour cause d'utilité publique de tout ou partie de ces terrains.

Art. 10. - Le décret d'autorisation institue en outre, à l'extérieur du périmètre mentionné à l'article précédent, un périmètre de protection dans lequel l'autorité administrative peut interdire ou réglementer les travaux ou les activités qui seraient de nature à compromettre, sur le plan technique, l'installation ou le fonctionnement du laboratoire.

Art. 11. - Des sources radioactives peuvent être temporairement utilisées dans ces laboratoires souterrains en vue de l'expérimentation.

Dans ces laboratoires, l'entreposage ou le stockage des déchets radioactifs est interdit.

Art. 12. - Un groupement d'intérêt public peut être constitué, dans les conditions prévues par l'article 21 de la loi n° 82-610 du 15 juillet 1982 d'orientation et de programmation pour la recherche et le développement technologique de la France, en vue de mener des actions d'accompagnement et de gérer des équipements de nature à favoriser et à faciliter l'installation et l'exploitation de chaque laboratoire.

Outre l'Etat et le titulaire de l'autorisation prévue à l'article 8, la région et le département où est situé le puits principal d'accès au laboratoire, les communes dont une partie du territoire est à moins de dix kilomètres de ce puits, ainsi que tout organisme de coopération intercommunale dont l'objectif est de favoriser le développement économique de la zone concernée, peuvent adhérer de plein droit à ce groupement.

Art. 13. - Il est créé, sous le nom d'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, un établissement public industriel et commercial, placé sous la tutelle des ministres de l'industrie, de la recherche et de l'environnement.

Cette agence est chargée des opérations de gestion à long terme des déchets radioactifs, et notamment :

- en coopération notamment avec le Commissariat à l'énergie atomique, de participer à la définition et de contribuer aux programmes de recherche et de développement concernant la gestion à long terme des déchets radioactifs ;
- d'assurer la gestion des centres de stockage à long terme soit directement, soit par l'intermédiaire de tiers agissant pour son compte ;
- de concevoir, d'implanter et de réaliser les nouveaux centres de stockage compte tenu des perspectives à long terme de production et de gestion des déchets et d'effectuer toutes études nécessaires à cette fin, notamment la réalisation et l'exploitation de laboratoires souterrains destinés à l'étude des formations géologiques profondes ;
- de définir, en conformité avec les règles de sûreté, des spécifications de conditionnement et de stockage des déchets radioactifs ;
- de répertorier l'état et la localisation de tous les déchets radioactifs se trouvant sur le territoire national.

Art. 14. - Il est créé, sur le site de chaque laboratoire souterrain, un comité local d'information et de suivi.

Ce comité comprend notamment des représentants de l'Etat, deux députés et deux sénateurs désignés par leur assemblée respective, des élus des collectivités territoriales consultées à l'occasion de l'enquête publique, des membres des associations de protection de l'environnement, des syndicats agricoles, des représentants des organisations professionnelles et des représentants des personnels liés au site ainsi que le titulaire de l'autorisation.

Ce comité est composé pour moitié au moins d'élus des collectivités territoriales consultées à l'occasion de l'enquête publique. Il est présidé par le préfet du département où est implanté le laboratoire.

Le comité se réunit au moins deux fois par an. Il est informé des objectifs du programme, de la nature des travaux et des résultats obtenus. Il peut saisir la commission nationale d'évaluation visée à l'article 4.

Le comité est consulté sur toutes questions relatives au fonctionnement du laboratoire ayant des incidences sur l'environnement et le voisinage. Il peut faire procéder à des auditions ou des contre-expertises par des laboratoires agréés.

Les frais d'établissement et le fonctionnement du comité local d'information et de suivi sont pris en charge par le groupement prévu à l'article 12.

Art. 15. - Un décret en Conseil d'Etat fixe en tant que de besoin les modalités d'application de la présente loi.

La présente loi sera exécutée comme loi de l'Etat.

Fait à Paris, le 30 décembre 1991.

FRANÇOIS MITTERRAND

Par le Président de la République :

Le Premier ministre,
ÉDITH CRESSON

*Le ministre d'Etat, ministre de l'économie,
des finances et du budget,*
PIERRE BÉRÉGOVOY

*Le ministre d'Etat, ministre de la fonction publique
et de la modernisation de l'administration,*
JEAN-PIERRE SOISSON

Le ministre de la recherche et de la technologie,
HUBERT CURJEN

Le ministre de l'environnement,
BRICE LALONDE

Le ministre délégué au budget,
MICHEL CHARASSE

Le ministre délégué à l'industrie et au commerce extérieur,
DOMINIQUE STRAUSS-KAHN

(1) Travaux préparatoires : loi n° 91-1381.

Assemblée nationale :

Projet de loi n° 2049 ;
Rapport de M. Christian Bataille, au nom de la commission de la production, n° 2115 ;
Discussion les 25 et 27 juin 1991 et adoption le 27 juin 1991.

Sénat :

Projet de loi, adopté par l'Assemblée nationale, n° 431 (1990-1991) ;
Rapport de M. Henri Revol, au nom de la commission des affaires économiques, n° 58 (1991-1992) ;
Discussion et adoption le 6 novembre 1991.

Assemblée nationale :

Projet de loi, modifié par le Sénat, n° 2319 ;
Rapport de M. Christian Bataille, au nom de la commission de la production, n° 2331 ;
Discussion et adoption le 25 novembre 1991.

Sénat :

Projet de loi, adopté avec modifications par l'Assemblée nationale en deuxième lecture, n° 110 (1991-1992) ;
Rapport de M. Henri Revol, au nom de la commission des affaires économiques, n° 127 (1991-1992) ;
Discussion et adoption le 11 décembre 1991.

Assemblée nationale :

Projet de loi, modifié par le Sénat en deuxième lecture, n° 2450 ;
Rapport de M. Christian Bataille, au nom de la commission mixte paritaire, n° 2464 ;
Discussion et adoption le 17 décembre 1991.

Sénat :

Projet de loi, adopté par l'Assemblée nationale ;
Rapport de M. Henri Revol, au nom de la commission mixte paritaire, n° 169 (1991-1992) ;
Discussion et adoption le 18 décembre 1991.

Annexe 4

OCDE/AEN

**Opinion Collective
du Comité de la Gestion des Déchets Radioactifs
(RWMC)**

Mars 1995

OPINION COLLECTIVE DU COMITÉ DE LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Les Fondements environnementaux et éthiques de l'évacuation des déchets radioactifs à vie longue dans les formations géologiques

Dans le cadre de son suivi général de la gestion des déchets radioactifs et s'appuyant sur les débats approfondis qui ont eu lieu lors de la récente réunion de travail de l'AEN consacrée aux aspects environnementaux et éthiques de l'évacuation des déchets radioactifs à vie longue [Paris, 2 et 3 septembre 1994], le Comité de la gestion des déchets radioactifs (RWMC) a procédé à une réévaluation des fondements environnementaux et éthiques de l'évacuation des déchets en formations géologiques lors de sa Session spéciale de mars 1995. La réflexion du RWMC a porté notamment sur les problèmes d'équité et de justice :

- *entre générations*, à savoir la responsabilité des générations actuelles concernant les risques et les charges potentiels qu'elles pourraient léguer aux générations futures ;
- *au sein des générations contemporaines*, à savoir la répartition des ressources et la participation de divers composants de la société contemporaine à un processus de décision équitable et ouvert permettant de choisir les solutions à mettre en œuvre en matière de gestion des déchets.

Les membres du RWMC de l'AEN, ayant analysé avec soin les problèmes environnementaux et éthiques, ainsi qu'ils sont décrits ultérieurement et examinés en détail dans le compte rendu de la Réunion de travail de l'AEN :

- considèrent que les principes éthiques d'équité entre générations et au sein des générations contemporaines doivent être pris en compte lors de l'évaluation de l'acceptabilité des stratégies de gestion à long terme des déchets radioactifs ;
- considèrent que, du point de vue de l'éthique et de la sûreté à long terme, l'évacuation définitive nous permet de mieux nous acquitter de nos responsabilités à l'égard des générations futures que des solutions d'entreposage provisoire qui sont synonymes de surveillance et de transmission de la responsabilité à long terme des déchets aux générations futures, et peuvent, finalement, être négligées par les sociétés de demain dont on ne peut préjuger de la stabilité ;

- notent, après avoir étudié les possibilités d'isoler comme il convient ces déchets de la biosphère, que l'évacuation dans des formations géologiques est la stratégie qui, aujourd'hui, rallie la majorité des suffrages ;
- estiment que la stratégie proposée pour l'évacuation dans les formations géologiques :
 - tient compte des questions d'équité entre générations dans la mesure où sont appliquées au futur lointain les mêmes normes de risques qu'aujourd'hui et où les obligations léguées aux générations futures sont limitées ;
 - tient compte également des questions d'équité au sein des générations contemporaines, en proposant que cette stratégie soit mise en œuvre selon un processus progressif s'étalant sur plusieurs décennies et intégrant les progrès de la recherche ; cette démarche permettra de consulter, à chaque étape, les parties intéressées, dont le public ;
- notent que le concept d'évacuation des déchets dans les formations géologiques n'exige pas de dispositions particulières pour la reprise des déchets à partir de dépôts profonds, mais que même après fermeture, il ne serait pas impossible de les reprendre, bien qu'à des conditions coûteuses ;
- attirent l'attention des générations actuelles, face à une politique de réduction du risque associé aux dépôts de déchets radioactifs, sur l'importance de ne pas perdre de vue les moyens mis en œuvre dans d'autres domaines où il serait possible d'abaisser plus encore les risques pour l'homme et l'environnement, et de se demander où les moyens disponibles pourraient être utilisés le plus efficacement.

À la lumière de ces réflexions, les membres du Comité :

- confirment que l'évacuation définitive des déchets radioactifs dans les formations géologiques peut être conçue et appliquée de façon à prendre en compte et à respecter les considérations éthiques et environnementales fondamentales ;
- concluent qu'il est justifié, du point de vue de la protection de l'environnement comme de l'éthique, de poursuivre la mise au point des dépôts en formations géologiques destinés à recevoir les déchets radioactifs à vie longue qu'il convient d'isoler de la biosphère sur des périodes supérieures à quelques siècles ;
- concluent que la mise en œuvre graduelle des projets d'évacuation des déchets en formations géologiques laisse place à des adaptations permettant de prendre en compte les progrès de la science ainsi que l'évolution de l'attitude de la société sur plusieurs décennies, et qu'elle n'exclut pas la possibilité d'autres solutions qui pourraient voir le jour ultérieurement.

Annexe 5

Liste des entretiens réalisés

Pilote du mémoire
P. Messulam

Assemblée Nationale
/ Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques
M. le Député C. Bataille
M. Maurice Laurent

Mission de coordination et de médiation
M. le Préfet J. Monestier

CEA-DCC (Commissariat à l'Énergie Atomique - Direction du Cycle du Combustible)
N. Camarcat
A. Régent
M. Viala
SSP (Service Synthèse et Prospective)
D. Lelièvre
DESD (Département Entreposage et Stockage des Déchets)
D. Iracane
P. Toulhoate
DRDD (Département du Retraitement, des Déchets et du Démantèlement)
J.P. Moncouyoux
E. Vernaz
F. Bart
D. Ghaleb

CEA-DRN (Commissariat à l'Énergie Atomique - Direction des Réacteurs Nucléaires)
M. Zaetta

CEA-IPSN
(Commissariat à l'Énergie Atomique - Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire)
M. Devillers

OCDE/AEN
P. Lalieux

DGEMP (Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières)
Service des Affaires Nucléaires
X. Ouin
DIGEC (direction du gaz, de l'électricité et du pétrole)
M. Guilbaud

DSIN (Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires)
A.C. Lacoste
M. Rousseau
H. Mignon
C. Feltin

DPPR (Direction pour la Prévention de la Pollution et des Risques)
P. Vesseron
A. Strebelle
M. Sauval

Ministère de la Recherche

F. Jacq

ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs)

Y. Kaluzny
D. Auverlot
M. Boissac

EdF-DPT (Electricité de France, Direction Production-Transport)

M. Dupraz

EdF-DC (Electricité de France, Délégation au Combustible)

M. Estève

EdF-DER (Electricité de France, Direction des Études et Recherches)

M. Boulot

COGÉMA

Branche Retraitement

J.L. Ricaut

Ph. Pradel

Usine de la Hague

P. Ledermann

Usine Melox

M. Arslan

CERN

M. Charpak

IRSID (Institut de Recherche de la Sidérurgie - Usinor-Sacilor)

M. Guttman

Ecole des Mines - CGS (Centre de gestion scientifique)

C. Riveline

Association Robin des Bois

J. Bonnemains

Bibliographie

Textes réglementaires

- Loi n°91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs
- Loi n°92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement
- Loi n°95-101 du 02 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement
- Arrêté du 18 décembre 1992 modifié relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés pour les installations nouvelles
- Arrêté du 18 décembre 1992 modifié relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés pour les installations existantes

Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques

- Rapport sur la gestion des déchets nucléaires à haute activité, député C. Bataille, 1990
- Rapport sur l'évolution de la recherche sur la gestion des déchets nucléaires à haute activité, député C. Bataille, 1996
- Mission de médiation sur l'implantation de laboratoires de recherche souterrains, député C. Bataille, La documentation française, mars 1994

Débats parlementaires

- Débats de l'Assemblée des 25 et 27 juin 1991 sur le projet de loi relatif aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs
- Débats du Sénat du 6 novembre 1991 sur le projet de loi relatif aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs

DSIN (Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires)

- Rapport d'activité 1995
- Dossiers sur la situation de l'aval du cycle nucléaire en Finlande, Suède, Suisse, Canada

DGEMP (Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières)

- Présentation de M. Mandil sur la stratégie énergétique de la France, septembre 1996
- L'énergie nucléaire en questions, le Cherche-midi éditeur, 1991
- L'énergie nucléaire en 110 questions, le Cherche-midi éditeur, 1996

DGEMP-DPPR (Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières - Direction pour la Prévention de la Pollution et des Risques)

- Lettre de mission Mandil-Vesseron pour un rapport sur les orientations stratégiques pour l'aval du cycle nucléaire

CEA (Commissariat à l'Energie Atomique)

- Brochures 1995 : l'énergie, la radioactivité, le cycle du combustible nucléaire, l'énergie nucléaire : de la fusion à la fission, l'homme et les rayonnements, l'atome, le fonctionnement d'un réacteur nucléaire.
- Traitement et gestion des déchets radioactifs dans les centres du CEA
- Stratégie de recherche dans le cadre de la loi du 30-12-91, doc. interne CEA-DCC
- Programme des recherches sur la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue, 1996-2006, doc. interne CEA-DCC, mai 1996
- Rapport d'activité 1995 : axe 1 : séparation et transmutation des éléments à vie longue
- Rapport d'activité 1995 : axe 2 : stockage en formation géologique profonde
- Rapport d'activité 1995 : axe 3 : conditionnement et entreposage de longue durée en surface
- Les déchets : recherche et développement
- Etude théorique de la dégradation d'un matériau soluble dans divers environnements d'un stockage géologique, S. Maillard, D. Iracane, CEA/DCC/DESD, octobre 1996
- Plaquettes de présentation, CEA/DCC/DRDD/Service de Confinement des Déchets
- Etude du comportement à long terme des matériaux vitrifiés, E. Vernaz, CEA/DCC/DRDD/SCD, conférence donnée au salon POLLUTECH 93

COGEMA

- Rapport environnement 1995
- Rapport annuel 1995
- l'établissement COGEMA-La Hague, 1994
- Plaquettes de présentation, La Hague
- COGEMA dans l'industrie mondiale du cycle du combustible nucléaire, juin 1995
- COGEMA, présentation de la stratégie, 09 novembre 1994
- Le retraitement et le recyclage des matières nucléaires, présentation, janvier 1996
- Retraiter pour recycler, présentation de La Hague, décembre 1996
- Retraiter pour recycler, présentation de Melox, mars 1997
- L'usine Melox, plaquette de présentation, 1997
- Le conditionnement définitif du Plutonium, état de l'art, 1996 (document pour le groupe de travail du G7 sur le Pu militaire)

EDF (Electricité de France)

- La stratégie d'EDF en matière d'aval du cycle du combustible nucléaire, présentation à la CNE, août 1996
- Bilan des décisions prises à ce jour dans le cycle du combustible, contribution EdF à la mission Mandil-Vesseron, février 1997
- Epures, le journal de la Direction des Etudes et Recherches, janvier 1997 : le Plutonium

ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs)

- Liste des publications, 1996
- A propos des déchets radioactifs, où en sommes-nous ?, novembre 1996
- Recherches préliminaires à l'implantation des laboratoires souterrains, bilan des travaux janvier 1994 à mars 1996
- Rapport d'activité 1995

CNE (Commission Nationale d'Evaluation)

- Rapport d'évaluation n°1, juin 1995
- Rapport d'évaluation n°2, juin 1996
- Audition transmutation, octobre 1996 (intervenants de CEA-DCC, CEA-DRN, EDF-DE)
- Séparation-transmutation : objectifs et limites, septembre 1996 (groupe de travail majoritairement CEA)

Groupe de travail conjoint EDF-CEA-ANDRA-COGEMA

- Le stockage direct des combustibles irradiés, bilan des études du groupe de travail 1992-1996

AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique)

- Requirements for the safe management of radioactive waste, proceedings of August 1995 meeting

OCDE/AEN (Agence pour l'Énergie Nucléaire de l'OCDE)

- Le point sur la gestion des déchets radioactifs, 1996

CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire)

- The Energy Amplifier : a description for the non specialist, C. Rubbia, jan 1996
- Conceptual design of a fast neutron operated high power Energy Amplifier, C. Rubbia & coll., sept. 1995
- A realistic Plutonium elimination scheme with high Energy Amplifiers and Thorium-Plutonium fuel, C. Rubbia & coll., dec. 1995
- Fast neutron incineration in the Energy Amplifier as an alternative to geologic storage : the case of Spain, C. Rubbia & coll., feb. 1997
- A tentative program towards a full-scale Energy Amplifier, C. Rubbia & coll., july 1996
- A comparison of the safety and environmental advantages of the Energy Amplifier and of magnetic confinement fusion, C. Rubbia, dec. 1995
- A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier, R. Fernandez, C. Rubbia & coll., feb. 1996

Gestion du Plutonium militaire

- Plutonium, Management and disposition of excess weapons, reactor-related options, National Academy of Sciences, Washington, 1995
- Joint US/Russian plutonium disposition study, september 1996 (entretiens G7+1)
- Management of separated Pu : the technical options, Nuclear Energy Agency, june 1996

Ouvrages techniques divers

- Nuclear chemical engineering, M. Benedict, T. Pigford, H. Levi, Mc Graw-Hill, 1981

Ecole des Mines de Paris

- Environmental impacts and their costs : the nuclear and fossil fuel cycles, final report of project funded by European Commission - DG XII, coordinated by A. Rabl, february 1995
- Le stockage des déchets radioactifs : perspective historique et analyse sociotechnique, thèse présentée au Centre de Sociologie de l'Innovation par J.C. Petit, juillet 1993

Antinucléaires

- Plutonium, das tödliche Erbe der Atomindustrie, die Grünen im europäischen Parlament, 1996
- Pamphlets Bündnis 90 - die Grünen :
 - Ausstieg aus der Atomkraft, Jetzt !, 1996
 - Klimaschutz : nur ohne Atomenergie, 1996
 - Energiewende 2020 : Ausstieg aus der Atomenergie ist notwendig, 1996
- serveur <http://www.greenpeace.org> (siège de Greenpeace)
- serveur <http://www.greenpeace.de> (branche allemande de Greenpeace)
- La dignité antinucléaire, Greenpeace, 1994
- Pamphlets divers de Greenpeace

Philosophie et sociologie

- La technique et la science comme idéologie, Jürgen Habermas, Gallimard, 1973
- Propos sur les pouvoirs, Alain, Gallimard, 1985
- Le Prince, Machiavel

Divers

- Feux follets et champignons nucléaires, G. Charpak, R. L. Garwin, Editions Odile Jacob Sciences, janvier 1997

Lexique

Sigles

AIEA	Agence Internationale de l'Energie Atomique
ANDRA	Agence Nationale des Déchets Radioactifs
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
CERN	Centre Européen de Recherche Nucléaire
CIPR	Commission Internationale de Protection Radiologique
CNE	Commission Nationale d'Evaluation de la recherche sur les déchets radioactifs
COGEMA	Companie Générale des Matières Nucléaires
EDF	Électricité de France
EFR	European Fast Reactor Concept européen de RNR pour le début du 21ème siècle
EPR	European Pressurized Reactor Projet franco-allemand de REP pour le début du 21ème siècle
EPIC	Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial
MIX	combustible hypothétique à base d'un mélange oxyde d'Uranium enrichi - oxyde de Plutonium
MOX	combustible à base d'un mélange oxyde d'Uranium appauvri - oxyde de Plutonium
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economique
OCDE/AEN	Agence de l'Energie Nucléaire de l'OCDE
ONU	Organisation des Nations Unies
OPECST	Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Techniques
REP	<i>réacteur à eau pressurisée</i>
RNR	réacteur à neutrons rapides (type Superphénix)
UOX	combustible à base d'oxyde d'Uranium enrichi

Lexique

Termes techniques

Actinides : chimiquement, désigne les éléments postérieurs à l'Actinium dans la table périodique des éléments. Concrètement, dans le cycle actuel, le terme désigne : Uranium, Plutonium, Neptunium, Américium, Curium.
Leurs *isotopes* sont les noyaux *fissiles* ou *fertiles*. du cycle actuel.

Actinides mineurs : désigne Neptunium, Américium, Curium.
Ces éléments n'existent pas à l'état naturel, contrairement à l'Uranium
Ils apparaissent au cours des réactions nucléaires dans les réacteurs, mais en très faible quantité seulement contrairement au Plutonium.

Amplificateur d'énergie : voir *systèmes hybrides*.

Barrière ouvragée : dans un *stockage géologique*, barrière de rétention artificielle constituée d'une épaisseur de quelques mètres d'argile autour des conteneurs de déchets.

Criticité (sous-critique) : notion caractérisant le déséquilibre création/absorption de neutrons au cours d'une réaction en chaîne neutronique en réacteur.

Décroissance radioactive : désintégrations nucléaires spontanées d'un stock de noyaux radioactifs s'accompagnant de l'émission de particules. En évolution tendancielle au cours du temps, ces mécanismes tendant à réduire progressivement la radioactivité initiale.

Entreposage : par opposition à la notion de *stockage*, désigne une solution de gestion des déchets à caractère temporaire, c'est-à-dire, où une reprise des colis doit, à terme, être envisagée.

Fertile : un noyau est dit fertile lorsqu'il est stable par interaction avec les *neutrons thermiques* mais transformable en noyau *fissile* par capture de neutron. Par exemple, ^{238}U est fertile et peut ainsi se transformer en ^{239}Pu .

Fissile : un noyau est dit fissile lorsqu'il peut facilement fissionner au choc d'un neutron.

Fission : réaction nucléaire de cassure d'un noyau en deux fragments, les *produits de fission*, suite au choc d'un neutron. La réaction, très énergétique, s'accompagne de l'émission d'un ou plusieurs neutrons, capables de propager ainsi la réaction en chaîne nucléaire.

Incinération : au sens des déchets radioactifs, opération consistant à fissionner en réacteur le Plutonium et les *actinides mineurs*.

Isotopes : se dit de deux noyaux d'un même élément chimique (ayant donc le même nombre de protons et le même cortège électronique) possédant un nombre différents de neutrons. Les isotopes ont des caractéristiques différentes en termes de *fission* et de *décroissance radioactive*.

Laboratoire souterrain : laboratoire situé en profondeur dans une formation géologique, permettant de conduire des recherches in situ de caractérisation géologique, afin de valider les modèles de comportement d'un *stockage géologique*.

Neutrons rapides : un réacteur nucléaire est dit à neutrons rapides lorsque les neutrons servant à la réaction en chaîne ne sont pas ralentis (voir *neutrons thermiques*). Cela nécessite l'emploi d'un liquide de refroidissement transparent aux neutrons et de grande capacité calorifique, comme le sodium ou le plomb fondus.

- Neutrons thermiques** : un réacteur nucléaire est dit à neutrons thermiques (ou lents) lorsque les neutrons servant à la réaction en chaîne sont très peu énergétiques. Cela s'obtient par l'emploi d'un "modérateur" dans le coeur (comme le graphite ou l'eau) dont la fonction est de ralentir, jusqu'à leur "thermalisation", les neutrons issus de la fission.
- Produits de fission** : les deux débris principaux du noyau original dans une réaction de fission.
Exemple : iode 129, césium 135, etc.
- Radiotoxicité** : toxicité radioactive pour l'Environnement ou pour l'Homme. Pour l'Homme, elle s'exprime en unités biologiques : les Sievert Sv.
- Réacteur à eau pressurisée** : réacteur utilisant de l'eau légère sous pression à la fois comme fluide pour transporter la chaleur, et comme ralentisseur de neutrons. Il s'agit d'un système à *neutrons thermiques*. L'essentiel du parc électronucléaire français est de ce type.
- Retraitement** : opération qui consiste à traiter le combustible usé afin d'en séparer les composants (uranium, plutonium et autres actinides, produits de fission). Le process de retraitement actuel à la Hague sépare l'Uranium, le Plutonium et vitrifie la solution finale d'Actinides mineurs et de *produits de fission*.
- Retraitement poussé** : séparation poussée des multiples composants du combustible usé, séparant l'Uranium, le Plutonium, les Actinides et éventuellement certains *produits de fission*. Ce concept n'est pas encore opérationnel.
- Séparation** : opération visant à séparer les éléments chimiques présents dans un colis de matières radioactives. La séparation est le résultat du *retraitement* des combustibles usés.
- Sous-générateur** : réacteur nucléaire produisant moins de combustible *fissile* qu'il n'en consomme.
Voir *surgénérateur*.
- Stockage** : par opposition à la notion d'*entreposage*, désigne une solution de gestion des déchets à caractère définitif, c'est-à-dire, sans hypothèse de reprise à terme des colis.
- Stockage direct** : stockage direct dans un *stockage géologique* du combustible irradié. Celui-ci est placé directement dans un conteneur idoine qui est ensuite stocké dans le *stockage géologique*.
- Stockage géologique** : stockage de déchets pendant des durées géologiques (plus de 10 000 ans) dans une structure géologique stable, en général à quelques centaines de mètres de profondeur (car les couches superficielles peuvent être affectées par les phénomènes climatiques).
- Surgénérateur** : réacteur nucléaire capable de produire plus de combustible *fissile* qu'il n'en consomme, par transmutation d'un élément *fertile*. Par exemple, Superphénix peut fonctionner en surgénérateur en créant plus de Plutonium qu'en en consommant, grâce à la transformation d' ^{238}U en ^{239}Pu par bombardement neutronique.
- Système hybride (ou Amplificateur d'énergie)** : nouveau concept de réacteur, avancé en particulier par le prix Nobel C. Rubbia, associant un réacteur sous-critique et un accélérateur de particules source de protons.
- Taux de Combustion** : énergie d'un combustible nucléaire libérée en réacteur par unité de masse, au cours du séjour total du combustible en réacteur. Elle s'exprime en MWjth/tMLI (Mégawattjoule par tonne de Métal Lourd Initial)
- Temps de demi-vie (ou période radioactive)** : temps nécessaire à la désintégration radioactive de la moitié d'un stock de noyaux radioactifs initialement présents.
- Transmutation** : opération consistant à soumettre un noyau nuisible à un bombardement neutronique afin de lui faire capturer un neutron et ainsi le transformer par une réaction nucléaire en un autre isotope, moins nocif (par exemple, à vie plus courte, ou non radioactif).