

les cahiers de



petit memento des déchets nucléaires

Éléments pour un débat sur les déchets nucléaires en France

numéro hors série

Global Chance

Association loi de 1901
à but non lucratif
(statuts sur simple demande)
17 ter rue du Val
92190 Meudon
globalchance@wanadoo.fr

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

Samir ALLAL : Économiste,
secrétaire de l'association

Edgar BLAUSTEIN : Économiste,
trésorier de l'association

Pierre CORNUT : Économiste

Benjamin DESSUS : Ingénieur
et économiste, président de
l'association

Yves MARIIGNAC : Consultant
scientifique

Jean-Claude RAY : Biophysicien

Les cahiers de Global Chance Numéro hors série septembre 2005

Directeur de la publication :
Benjamin DESSUS

Rédaction : Benjamin Dessus

Maquette : Philippe Malisan

Imprimerie : JV Impression

Sommaire

Éditorial

Synthèse

Que nous apprennent ces fiches ?

Matières et risques

- 1 - Caractérisation des matières et déchets nucléaires
- 2 - Principales matières mises en jeu
- 3 - Principaux risques liés aux matières et déchets

Choix et indicateurs

- 4 - L'option française du « retraitement-recyclage »
- 5 - Matières « valorisables » et déchets « ultimes »
- 6 - Quels principes pour la gestion des déchets à vie longue
- 7 - Quels indicateurs pour les déchets à vie longue ?

Flux et stocks

- 8 - Flux associés à la gestion actuelle
- 9 - Stocks (a) - Déchets stockés ou conditionnés
- 10 - Stocks (b) - Déchets en attente, matières « valorisables »

De 1991 à 2006...

- 11 - Principes et lacunes de la loi
- 12 - Des recherches non conclusives

Et dans 100 ans ?

- 13 - Stratégies de production d'électricité
- 14 - Scénarios énergétiques et stratégies technologiques
- 15 - Bilan des matières nucléaires des scénarios
- 16 - Que nous apprennent les scénarios ?
- 17 - Moindre mal ou fuite en avant ?

Éléments de réflexion

- 18 - Quel processus de décision ?
- 19 - L'aspect économique
- 20 - L'aspect international

Bibliographie

Éditorial

A la demande des ministres de l'industrie et de l'environnement, la Commission Nationale du Débat Public (CNDP) organise cet automne un débat public consacré aux déchets nucléaires de haute et moyenne activité. Une commission particulière (la CPDP déchets) s'est mise en place et anime une série d'auditions et de débats publics sur les différentes questions que soulève la gestion des déchets dits « de haute et moyenne activité à vie longue ». En parallèle, la même CNDP s'est saisie de deux autres questions concernant l'énergie nucléaire : le projet de construction d'un réacteur EPR dit, à tort, de troisième génération, et de la ligne à haute tension proposée pour l'évacuation de l'électricité qu'il produira.

L'association Global Chance, dont l'une des vocations est de mettre l'expertise scientifique de ses membres à la disposition du débat public s'implique très naturellement dans l'ensemble de ces débats.

Dans le cas des déchets nucléaires, il nous a semblé indispensable de mettre à disposition des citoyens certains des éléments factuels et pédagogiques qui manquent la plupart du temps aux non spécialistes. Le domaine des déchets nucléaires, comme plus généralement l'ensemble du domaine nucléaire, est longtemps resté et reste encore largement le domaine réservé d'un très petit nombre d'experts, la plupart du temps liés aux industriels promoteurs de cette filière et d'une administration jalouse de ses prérogatives et fortement dépendante des industriels concernés.

La complexité physique des problèmes rencontrés, des concepts utilisés, du vocabulaire et du formalisme employés par les spécialistes, justifie souvent, de la part du lobby nucléaire et de l'administration, le recours à un discours volontairement simpliste et supposé « transparent » destiné principalement à rassurer le grand public et non pas à l'informer, ni moins encore à lui permettre de réfléchir et de débattre.

C'est pourquoi nous avons décidé de mettre aujourd'hui à la disposition des participants des différents débats une vingtaine de fiches, courtes, factuelles, sur des sujets où les discours s'appuient bien souvent sur l'opacité, l'à peu près, l'amalgame, la contrevérité, voire le mensonge.

Nous pensons en effet que la démocratie participative commence par une information aussi complète que possible aux non spécialistes, même si elle présente une certaine complexité.

Nous n'avons évidemment pas essayé de traiter de l'ensemble des questions concernant les déchets nucléaires. Nous avons concentré notre analyse sur les aspects de cette question les plus étroitement liés au débat qui s'engage en France et qui porte sur les déchets de haute et moyenne activité.

Les fiches présentées se réfèrent à des sources accessibles au public. Elles s'appuient largement sur le travail effectué par des membres de notre association pour sa contribution au « dossier du débat » présenté par la CPDP déchets. Elles sont généralement conçues pour pouvoir être lues de façon autonome. Elles sont néanmoins regroupées en six chapitres principaux :

- Matières et risques,
- Choix et indicateurs,
- Flux et stocks,
- De 1991 à 2006...
- Et dans 100 ans...
- Éléments de réflexion.

Nous espérons que ces fiches apporteront une contribution positive à l'objectif de démocratie participative, de transparence et de qualité du débat qui sont au centre de la démarche engagée par la Commission Particulière du Débat Public.

Que nous apprennent ces fiches ?

Nous résumons ci-dessous les principaux apports qui se dégagent des différents chapitres auxquels se rapportent les fiches qui suivent.

Matières et risques

Les trois fiches de ce chapitre tentent d'explicitier les notions indispensables à la compréhension des questions concernant les matières nucléaires et les déchets : nature des rayonnements, durée de vie de la radioactivité, niveau de cette radioactivité. Ces notions permettent de dresser un premier tableau des principales catégories de déchets. On y trouve également une description des principales matières mises en jeu dans l'industrie nucléaire et leurs caractéristiques et un tableau qui montre la grande quantité et la diversité des matières en question. La dernière fiche de ce chapitre donne une idée résumée de la nature et de l'intensité des différents dangers potentiels des différentes matières présentes dans l'activité nucléaire : radioactivité, radio toxicité, réactivité, toxicité chimique. Un tableau simplifié permet de fournir des indications qualitatives sur les principaux dangers potentiels que présentent les matières nucléaires principales qu'on rencontre dans l'industrie nucléaire française.

Choix et indicateurs

La première fiche de ce chapitre est consacrée à l'analyse des conséquences du choix très particulier fait par la France de retraitement du combustible nucléaire usé et de son recyclage sous forme de MOX. On y met en cause le bilan très favorable qu'en présentent les promoteurs de cette stratégie, aussi bien en termes de bilan matières que de risques pour la santé et la prolifération. On insiste de surcroît sur les contradictions qu'implique la stratégie de gestion des déchets dits « ultimes » actuelle (la vitrification) avec toute perspective de transmutation des actinides et des produits de fission pourtant présentée comme la voie de l'avenir.

La seconde de ces fiches montre que la distinction opérée par l'administration et le lobby nucléaire entre matières valorisables et déchets nucléaires est très largement artificielle et dangereuse pour l'appréciation de la nature et de l'ampleur des problèmes de gestion des déchets et matières nucléaires. Cette distinction sémantique est largement infondée puisque les matières dites valorisables peuvent à tout instant se transformer en déchets au gré des fluctuations des politiques énergétiques et que le progrès technique revendiqué par les promoteurs même du nucléaire peut rendre valorisables des déchets jusque-là considérés comme « ultimes ». Elle permet surtout en fait de masquer une série de problèmes d'environnement, de santé et de sûreté majeurs, en concentrant la discussion sur les déchets ultimes qui ne représentent qu'un faible pourcentage des matières dangereuses à gérer dans les décennies qui viennent.

Les deux dernières fiches du chapitre tentent de définir les principes et les critères d'une gestion optimale des matières et des risques et proposent une batterie d'indicateurs, (proches des quantités physiques, principalement des masses des matières les plus significatives) qui permettent d'évaluer la pertinence et les problèmes des diverses stratégies de gestion.

Flux et stocks

La première fiche de ce chapitre explicite la nature et l'ampleur des flux de matières nucléaires dans les activités de l'industrie nucléaire. Elle met en relief le fait que les stocks de plutonium séparé et non utilisé, de MOX et d'UOX irradiés non retraités, non seulement ne diminuent pas mais augmentent chaque année. D'autre part l'activité de retraitement recyclage produit chaque année un volume de l'ordre de 550 m³ de déchets B (à moyenne activité et à vie longue).

La seconde fiche décrit les principales catégories de déchets de haute et moyenne activité déjà conditionnés et entreposés en attente d'une solution définitive : colis vitrifiés (d'actinides et de produits de fission) divers, et déchets produits à la Hague, coques et embouts, boues de traitement, déchets solides d'exploitation des usines de traitement et des centres du CEA. La dernière fiche montre l'importance et la diversité des matières et déchets non conditionnés en attente de stockage ou de traitement pour une valorisation éventuelle mais encore tout à fait théorique.

De 1991 à 2006

La première fiche de ce chapitre explicite l'objectif, le contenu de la loi dite Bataille sur la gestion des déchets et en montre les lacunes. La seconde en dresse un bilan critique qui montre à l'évidence qu'il ne peut être question de choisir dès 2006 une des trois voies envisagées et que des compléments importants de recherche doivent être impérativement engagés avant toute décision d'investissement dans une ou plusieurs des voies à l'étude. C'est tout particulièrement le cas des stockages souterrains dont l'étude est encore beaucoup trop embryonnaire pour autoriser des conclusions.

Et dans 100 ans

L'ensemble des fiches de ce chapitre permet, en se projetant dans l'avenir à travers des scénarios très diversifiés (aussi bien du point de vue des besoins d'électricité que des technologies nucléaires mises en œuvre) de prendre conscience de l'éventail des choix possibles et de la diversité de leurs conséquences en termes de gestion des matières nucléaires dangereuses. Dans le contexte de scénarios contrastés de production d'électricité en 2050 (de 300 à 900 TWh) on envisage un arrêt du nucléaire à cet horizon ou son renouvellement jusqu'à un niveau élevé (600 TWh). Le croisement de ces scénarios contrastés d'appel au nucléaire avec des stratégies techniques également contrastées permet d'explicitier six scénarios :

- Deux scénarios de *poursuite* de l'option nucléaire (renouvellement et accroissement du parc de réacteurs), soit dans une *continuité* technologique soit avec une *rupture* par introduction d'une nouvelle filière RNR (réacteurs à neutrons rapides); un scénario de *maintien* de l'option nucléaire (renouvellement partiel avec repli du parc) et la même *rupture* technologique que précédemment;
- Trois scénarios de *sortie* de l'option nucléaire qui se distinguent sur la gestion du combustible : *continuité* de la gestion actuelle, introduction d'une *rupture* technologique, ou *abandon* de la stratégie de retraitement.

L'analyse des bilans matière à travers les indicateurs définis au chapitre « choix et indicateurs » met en évidence quelques points majeurs.

En cas de poursuite du nucléaire dans la continuité fondée sur l'emploi d'EPR, le bilan des matières se dégrade extrêmement rapidement et conduit à des stocks de plutonium, de MOX irradié, de produits de fission et d'actinides mineurs considérables (un rapport de 7 à plus de 10 par rapport à la situation d'aujourd'hui selon les matières). Les scénarios où sont introduites des ruptures technologiques à partir de 2040 améliorent sensiblement la situation, revenant à une situation analogue en 2130 à celle que laisserait le parc actuel à sa fin de vie (2045). Mais cette stratégie suppose gagné le pari scientifique, économique et social de la mise en place de toute une industrie nouvelle, elle-même porteuse de nouveaux risques.

Toutes les options d'arrêt du parc à sa fin de vie laissent des situations moins préoccupantes. L'introduction de réacteurs dédiés à l'incinération du plutonium en fin de vie du parc, la plus audacieuse, permet de diviser la quantité finale de plutonium du parc d'un facteur 5 environ. C'est dire qu'on ne peut en aucun cas éviter d'introduire les différentes options d'arrêt du nucléaire à terme dans un débat sur la gestion des déchets de l'industrie nucléaire civile.

Il apparaît enfin clairement que la stratégie de séparation transmutation présentée par les tenants du nucléaire comme la voie royale repose sur des manipulations sémantiques, une exigence implicite de poursuite du nucléaire sur plus d'un siècle et sur des paris scientifiques industriels, économiques et sociaux majeurs.

Éléments de réflexion

Les fiches rassemblées dans ce chapitre abordent les questions de gouvernance, les questions économiques et apportent un éclairage international. La fiche qui traite de gouvernance insiste sur le partage des connaissances indispensables, sur la nécessité de promotion d'une expertise plurielle et contradictoire, sur l'importance de la notion de réversibilité dans les choix décisionnels comme dans les choix techniques. La fiche économique montre l'ampleur des coûts anticipés, l'incertitude qui règne encore sur leur détermination précise et le peu de garanties qui existent sur les provisions constituées. L'éclairage international enfin permet de montrer que la plupart des nations qui ont recours au nucléaire ont choisi d'autres voies que celle présentée en France comme la seule possible.

Caractérisation des matières et déchets nucléaires

Derrière l'appellation unique de « déchets radioactifs » se cache en réalité un ensemble extrêmement complexe de matières et de colis aux caractéristiques très variées, présentant des risques très divers. On les distingue notamment par la nature et l'intensité de leur radioactivité, leur durée de vie, ou encore leurs spécificités physico-chimiques. Les déchets radioactifs produits aujourd'hui en France, principalement par l'industrie électro-nucléaire (mais aussi pour la défense, la recherche, l'industrie, la médecine...) forment une gamme très étendue.

Ce n'est que fin 2004, après plus de 50 années de programmes nucléaires, qu'un inventaire exhaustif des déchets radioactifs a été réalisé pour la première fois par les pouvoirs publics. Bien que laissant de côté les entreposages de matières dites « valorisables » (voir fiche 5), cet inventaire, réalisé par l'ANDRA, recense une centaine de types de déchets présentant des « caractéristiques homogènes ».

Les différents types de déchets sont ensuite regroupés en grandes catégories. Celles-ci ne sont pas intangibles mais définies par la réglementation et donc susceptibles d'évoluer avec le temps ou de varier d'un pays à un autre. Ces catégories sont principalement basées sur :

- La durée de vie : il s'agit en fait du rythme auquel leur radioactivité décroît. Chaque élément radioactif est ainsi caractérisé par une durée, appelée période ou « demi-vie », où sa quantité diminue de moitié par désintégration de ses atomes (formant d'autres éléments, à leur tour radioactifs ou stables). Sa radioactivité est donc réduite d'un facteur 2 à chaque période, et par extension d'un facteur 1000 environ après 10 périodes. La durée de vie d'un déchet radioactif dépend ainsi de la période et de la concentration des différents éléments radioactifs qu'il contient.
- Le niveau de radioactivité et, le cas échéant, la nature des rayonnements associés : la plus ou moins grande concentration des matières radioactives dans les déchets et surtout l'intensité du rayonnement des éléments radioactifs concernés, déterminent une activité massique, exprimée en nombre de désintégrations par seconde par unité de masse considérée (soit des becquerels par gramme, Bq/g). La radioactivité émise peut être de différentes natures : les rayonnements dits alpha (noyaux de deux protons et deux neutrons), bêta (électrons), et enfin gamma (photons) aux effets très différents du fait de masses, de niveaux d'énergie et de pouvoirs de pénétration très distincts.

La classification en vigueur en France, basée sur ces critères et sur les filières de gestion des déchets correspondantes (mises en œuvre, simplement définies ou même seulement envisagées), retient deux seuils de durée de vie, de 100 jours et de 30 ans, et quatre niveaux de radioactivité.

Critères appliqués en France pour la durée de vie et l'activité des déchets radioactifs

Durée de vie		Activité massique	
Vie très courte	Moins de 100 jours	Très faible activité	Moins de 10^2 Bq/g
Vie courte	Entre 100 jours et 30 ans	Faible activité	Entre 10^2 et 10^5 Bq/g
Vie longue	Plus de 30 ans	Moyenne activité	Entre 10^5 et 10^8 Bq/g
		Haute activité	Plus de 10^8 Bq/g

Outre les déchets à vie très courte, gérés « par décroissance radioactive » (leur radioactivité diminue d'un facteur 1000 en quelques semaines à quelques années), la durée de vie distingue principalement les déchets à vie courte des déchets à vie longue en regard des échéances de tenue, et de surveillance, d'ouvrages destinés à leur stockage : une « durée de vie » de 30 ans correspond à une décroissance d'un facteur 1000 environ au bout de 300 ans. Les déchets à vie longue peuvent quant à eux atteindre des durées de vie très supérieures, qui se comptent en centaines de milliers d'années, voire davantage.

Les seuils d'activité massique retenus sont choisis pour délimiter clairement des catégories de déchets correspondant à différents niveaux de radioactivité rencontrés dans les matières et les installations de l'industrie nucléaire. Grosso-modo, les déchets haute activité, dont les activités peuvent atteindre des niveaux de 10^{10} Bq/g, concentrent les éléments radioactifs directement issus de la réaction de fission et contenus dans le combustible nucléaire. Les déchets moyenne activité correspondent à des matériaux irradiés directement au contact des précédents, tels que les gaines du combustible ou les structures internes à la cuve des réacteurs. Les déchets faible activité sont surtout les matériels utilisés pour les dif-

férentes opérations de gestion du combustible, potentiellement contaminés au cours de ces opérations, tels que les tenues de protection du personnel. Enfin, les déchets très faible activité proviennent notamment de la contamination des installations nucléaires au cours de leur exploitation (bétons, aciers...).

Les ordres de grandeur d'activité et de volume des différentes catégories de déchets sont très contrastés. Seules deux des six grandes catégories sont rigoureusement concernées par les recherches menées dans le cadre de la loi de 1991 et le débat parlementaire prévu en 2006 : les déchets moyenne activité à vie longue et les déchets haute activité. Limiter la réflexion à ces seules catégories est pourtant très réducteur : d'une part, ce ne sont pas les seules catégories pour lesquelles les solutions de gestion restent à ce jour à l'étude ; d'autre part, les options envisageables pour gérer les déchets les plus problématiques ont des répercussions importantes sur les autres catégories.

Principales catégories de déchets radioactifs en France et filières de gestion

Activité	Période	Vie très courte (VTC)	Vie courte (VC)	Vie longue (VL)
Très faible activité (TFA)			2. Déchets TFA Essentiellement gravats, ferrailles, issus du démantèlement et déchets industriels spéciaux ; résidus miniers du traitement de l'uranium. <i>Stockage dédié en surface (Morvilliers) et filières de recyclage à l'étude.</i>	
Faible activité (FA)		1. Déchets VTC Essentiellement issus des activités médicales ou industrielles. <i>Gérés par décroissance puis dans les filières de gestion de déchets conventionnels.</i>	3. Déchets FMA-VC Issus de l'exploitation, maintenance, démantèlement des installations industrielles et de recherche du nucléaire. <i>Stockage en surface (Centre de stockage de la Manche, puis Centre de stockage de l'Aube) sauf filières à l'étude pour déchets particuliers (déchets tritiés, sources scellées...).</i>	4. Déchets FA-VL Déchets de procédés ou d'assainissement, plus démantèlement, notamment déchets graphite et radifères. <i>Stockage dédié en subsurface à l'étude.</i>
Moyenne activité (MA)				5. Déchets MA-VL Déchets issus des structures de réacteurs et du retraitement (gainés, boues...). <i>Filières à l'étude.</i>
Haute activité (HA)			6. Déchets HA Matières du combustible irradié, en l'état ou en déchets vitrifiés (en cas de retraitement). <i>Filières à l'étude.</i>	

Principales matières mises en jeu

Les matières en jeu dans la gestion des déchets radioactifs ont essentiellement deux origines :

- Les matières liées à *l'extraction, la transformation et l'irradiation* dans les réacteurs du combustible nucléaire : elles proviennent du traitement du minerai naturel d'uranium puis des réactions nucléaires engendrées dans le combustible qui en est extrait ;
- Les matières générées par *l'activation*, sous l'effet des radiations issues des précédentes, d'éléments chimiques inertes en éléments radioactifs dans les fluides, les équipements et les structures au contact des produits combustibles et dérivés.

Le tableau de la page suivante indique pour les principaux radionucléides mis en jeu dans ces différentes réactions leurs principales caractéristiques : durée de vie, type de radioactivité, et niveau de radiotoxicité (c'est-à-dire le degré de nocivité lié à leur radioactivité en cas de pénétration dans l'organisme).

Le point de départ est donc l'extraction de l'uranium naturel, composé à 0,7 % environ de l'isotope ^{235}U , le reste étant essentiellement l'isotope ^{238}U , avec un peu d' ^{234}U . Le premier a la propriété d'être fissile : il libère, par *fission*, les grandes quantités d'énergie récupérées dans les chaudières que sont les réacteurs nucléaires. On augmente le rendement de cette réaction en concentrant, par une opération dite d'enrichissement, la proportion d'uranium fissile dans le combustible : celui-ci utilise donc de l'uranium enrichi contenant 4 % environ d' ^{235}U . Cet enrichissement produit de grandes quantités d'uranium dit appauvri, composé d' ^{238}U avec quelques millièmes d' ^{235}U .

L'isotope ^{238}U , faiblement radioactif, a la propriété d'être *fertile* : en capturant certains neutrons émis par les réactions de fission, il devient ^{239}Pu , le principal isotope fissile du plutonium. D'autres réactions du même type, à partir aussi de l' ^{234}U et même de l' ^{235}U , puis des différentes matières à mesure qu'elles sont ainsi créées et s'accumulent, font apparaître d'autres éléments de plus en plus lourds : toute une gamme d'isotopes du plutonium ainsi que des éléments dénommés *actinides mineurs*, comme le neptunium, l'américium, le curium, etc. Ces actinides mineurs sont eux-mêmes radioactifs et souvent extrêmement radiotoxiques.

Parallèlement, la fission d' ^{235}U et d'autres isotopes fissiles qui apparaissent (^{239}Pu , ^{241}Pu), génère un spectre très étendu de *produits de fission*. Une partie sont des éléments stables ou à très courte période, mais nombre d'entre eux présentent une radioactivité et une durée de vie significatives – même si leur radiotoxicité est en général moindre que celle des actinides.

Hormis une fraction susceptible de s'échapper pour contaminer des éléments externes, ces matières sont enfermées dans le combustible irradié à son déchargement du réacteur. Deux options se présentent alors pour la gestion du combustible usé. La première consiste à le considérer comme un déchet : l'assemblage combustible est alors la matrice d'entreposage, puis de stockage définitif de toutes les matières radioactives qu'il contient.

La seconde, partiellement mise en œuvre en France, consiste à séparer, par retraitement, l'uranium et le plutonium de l'ensemble des actinides mineurs et produits de fission (qui composent respectivement environ 95 %, 1 %, 1 % et 4 % d'un combustible standard déchargé du parc EDF aujourd'hui). Les premiers, jugés « valorisables » à cause de leurs propriétés fissiles ou fertiles, peuvent être réutilisés à court ou long terme dans de nouveaux combustibles (tel le MOX, mélange de plutonium issu du retraitement et d'uranium appauvri, ou l'URE, à l'uranium issu du retraitement ré-enrichi). Actinides mineurs et produits de fission, classés comme « déchets ultimes », sont alors enfermés dans des colis vitrifiés. Cette option repose sur des procédés physiques et chimiques qui conduisent à disséminer une fraction non négligeable des matières radioactives dans de nouvelles catégories de déchets (gaines métalliques du combustible, boues issues du traitement chimique de séparation) et dans l'environnement (rejets liquides et gazeux).

Principaux radionucléides⁽¹⁾ : période, radioactivité, radiotoxicité

Isotope	Symbole	Période (ans, jours, heures, secondes)	Radio-activité ⁽²⁾	Radio-toxicité ⁽³⁾	Source / Propriétés
Tritium	³ H	12,3 a	β pur	IV	
Carbone-14	¹⁴ C	5 730 a	β pur	III	Produit d'activation
Chlore-36	³⁶ Cl	300 000 a	γ mou	III	Produit d'activation
Potassium-40	⁴⁰ K	1,3 x 10 ⁹ a	β, γ	IV	Naturel / produit de fission
Cobalt-60	⁶⁰ Co	5,3 a	β, γ	II	Produit d'activation
Krypton-85	⁸⁵ Kr	10,7 a	β, γ	IV	Produit de fission
Strontium-90	⁹⁰ Sr	28,8 a	β pur	II	Produit de fission
Zirconium-95	⁹⁵ Zr	64 j	β, γ	II	
Niobium-95	⁹⁵ Nb	35 j	β, γ	III	
Technétium-99	⁹⁹ Tc	214 000 a	β	IV	Produit de fission
Ruthénium-103	¹⁰³ Ru	39 j	β, γ	IV	
Ruthénium-106	¹⁰⁶ Ru	372 j	β	II	Produit de fission
Rhodium-106	¹⁰⁶ Rh	30 s	β, γ	IV	Produit de fission
Argent-110	^{110m} Ag	250 j	β, γ	II	Produit d'activation
Antimoine-125	¹²⁵ Sb	1 010 J	β, γ	III	Produit de fission
Iode-129	¹²⁹ I	1,57 x 10 ⁷ a	β, γ mou	IV	Produit de fission
Iode-131	¹³¹ I	8 j	β, γ dur	II	
Iode-133	¹³³ I	20 h	β, γ	III	
Césium-134	¹³⁴ Cs	2,1 a	β, γ mou	III	Produit de fission
Césium-135	¹³⁵ Cs	2,3 x 10 ⁶ a	β	III	Produit de fission
Césium-137	¹³⁷ Cs	30 a	β, γ dur	III	Produit de fission
Cérium-144	¹⁴⁴ Ce	285 j	β, γ	II	Produit de fission
Europium-154	¹⁵⁴ Eu	8,6 a	β, γ	II	Produit de fission
Europium-155	¹⁵⁵ Eu	4,7 a	β, γ	II	Produit de fission
Thorium-230	²³⁰ Th	75 000 a	α, γ	I	
Uranium-232	²³² U	69 a	α, γ	I	
Uranium-233	²³³ U	162 000 a	α, γ	I	
Uranium-234	²³⁴ U	245 400 a	α	I	Fertile
Uranium-235	²³⁵ U	7,1 x 10 ⁸ a	α, γ	I	Fissile
Uranium-236	²³⁶ U	2,3 x 10 ⁷ a	α	II	Artificiel
Neptunium-237	²³⁷ Np	2,1 x 10 ⁶ a	α, γ	I	Actinide mineur
Uranium-238	²³⁸ U	4,47 x 10 ⁹ a	α, γ	IV	Naturel, fertile
Plutonium-238	²³⁸ Pu	86,4 a	α	I	Artificiel, fertile
Plutonium-239	²³⁹ Pu	24 390 a	α, γ	I	Artificiel, fissile
Plutonium-240	²⁴⁰ Pu	6 563 a	α	I	Artificiel, fertile
Américium-241	²⁴¹ Am	432,2 a	α, γ	I	Actinide mineur
Plutonium-241	²⁴¹ Pu	14,4 a	β	I	Artificiel, fissile
Curium-242	²⁴² Cm	163 j	α	I	Actinide mineur
Curium-244	²⁴⁴ Cm	18 a	α, γ	I	Actinide mineur

(1) Ce tableau présente les principaux radionucléides présents dans les déchets radioactifs et les matières du cycle du combustible nucléaire. Ils sont classés ici par numéro de masse atomique.

(2) Radioactivité : α = alpha, β = beta, γ = gamma

(3) Classification en groupes de radiotoxicité (gr. I à IV) selon le Décret n° 86-1103.

Dangerosité intrinsèque des matières et déchets

Les matières radioactives concentrées dans les déchets ou les produits de la chaîne combustible présentent, selon leurs caractéristiques et leurs propriétés physico-chimiques, des degrés divers de danger potentiel. Les risques liés à leur gestion sont déterminés par les moyens mis en œuvre pour tenir compte de cette dangerosité intrinsèque.

Différents facteurs entrent en jeu pour déterminer la dangerosité des matières présentes dans l'inventaire des produits « en attente » et des déchets reconnus comme tels.

La radioactivité

Le premier est celui de leur radioactivité en tant que telle, plus ou moins importante en intensité et en type de rayonnements ; elle définit le risque associé à une présence au contact ou à proximité de ces matières. Les caractéristiques de la radioactivité émise varient très fortement d'un radionucléide à l'autre, y compris au sein des isotopes d'un même élément chimique.

L'intensité du rayonnement d'un radionucléide est liée au nombre de désintégrations qu'il produit dans un temps donné, défini par sa période radioactive (le temps nécessaire à ce que la moitié d'une quantité donnée de ce radionucléide se soit désintégrée). Ainsi en général une matière à longue durée de vie émet peu de rayonnements, tandis qu'une matière à courte durée de vie irradie plus fortement.

Les particules émises par la radioactivité des matières considérées sont plus ou moins chargées en énergie (masse, charge électrique, vitesse), ce qui détermine à la fois leur pouvoir ionisant (l'interaction avec la matière qu'elles rencontrent) et leur pouvoir pénétrant. Les rayonnements de type α (alpha), lourds et chargés électriquement, interagissent fortement avec la matière, mais arrêtés par une simple feuille de papier ou une petite épaisseur d'air, ils sont essentiellement dangereux en cas d'incorporation par l'organisme et d'irradiation directe des cellules (voir ci-dessous). Les émissions de type β (bêta), beaucoup plus légères mais chargées positivement ou négativement, interagissent facilement aussi avec la matière. Plus pénétrantes, elles nécessitent des protections plus importantes, comme par exemple quelques millimètres de feuille d'aluminium. Enfin, les émissions γ (gamma), sans masse et sans charge, interagissent peu avec la matière mais sont extrêmement pénétrantes et nécessitent des protections très lourdes. Il faut par exemple pour les arrêter plusieurs centimètres de plomb.

En fonction du type et de l'intensité de radioactivité qu'ils émettent, les produits de la chaîne combustible et les déchets radioactifs présentent un pouvoir d'irradiation extrêmement contrasté : il est par exemple possible de manipuler à mains nues du minerai d'uranium, alors que quelques minutes passées sans protection à proximité d'un colis de déchets vitrifiés, concentrant les produits de fission et actinides mineurs issus du combustible après retraitement (voir fiche 4), sont mortelles.

La désintégration d'un élément radioactif ne produit pas nécessairement un élément stable : il existe au contraire des « familles » de décroissance radioactive, créées par des désintégrations successives à partir d'un atome lourd vers des éléments de plus en plus légers. La radioactivité d'une matière ou d'un déchet, si elle tend toujours à diminuer avec le temps, peut ainsi varier de façon non négligeable. Par exemple, la désintégration de ^{241}Pu en ^{241}Am (américium) dans le plutonium n'augmente pas la radioactivité totale mais rend nécessaire des protections supplémentaires du fait de ses rayonnements γ beaucoup plus forts que ceux du plutonium.

La radiotoxicité

Elle décrit la nocivité du produit en cas d'irradiation interne (ingestion, inhalation) ou de contact (peau), sur le même mode que la toxicité chimique qui doit pour certains éléments être également prise en compte (plomb, arsenic, etc.).

La radiotoxicité dépend de multiples paramètres tels que le type de radioactivité du radionucléide considéré et sa « durée de vie biologique », caractérisée par le temps qu'il faut pour que la moitié d'une quantité incorporée ait disparu de l'organisme (ce temps est lui-même fonction du rythme de décroissance du radionucléide et de la vitesse à laquelle l'organisme l'évacue par les voies naturelles).

La radiotoxicité des radionucléides rencontrés dans la chaîne du combustible et les déchets peut varier de plusieurs ordres de grandeur. À radioactivité égale (nombre de désintégrations par seconde) incorporée par l'organisme, la toxicité de l'eau tritiée (eau formée avec l'isotope radioactif de l'hydrogène, le tritium ^3H) serait 350 fois moindre que celle de ^{40}K (potassium), présent naturellement dans l'organisme ; à l'inverse celle du plutonium serait 40 fois plus élevée.

En règle générale, les éléments radioactifs les plus lourds et les moins mobiles comme les actinides mineurs (dont la plupart des isotopes sont émetteurs α) présentent une radiotoxicité supérieure aux éléments plus légers et plus mobiles comme les produits de fission. La radiotoxicité de certains isotopes du plutonium est telle que l'inhalation de quelques dizaines de microgrammes de plutonium suffit pour déclencher de façon certaine à terme un cancer des poumons.

La réactivité

Troisième élément, la plus ou moins grande stabilité de ces matières (réactivité chimique, caractère inflammable...) entre également en compte. Elle détermine en effet le risque de relâchement, dans des conditions données de confinement et d'entreposage ou de stockage, d'une fraction donnée des matières considérées.

Dans ce domaine, leurs propriétés fissiles (capables de produire une réaction de fission) ou fertiles (capables de produire un élément fissile) distinguent les matières dites « nucléaires » des autres : elles présentent notamment des risques différents sur le plan de la sûreté avec le risque de criticité (réaction nucléaire), et sur le plan de la prolifération, c'est-à-dire leur détournement pour la fabrication d'armes atomiques.

Les principales matières nucléaires sont le plutonium et l'uranium. La possibilité d'utiliser ces matières pour la fabrication d'une charge nucléaire dépend directement de leur enrichissement en isotopes fissiles. Il suffit de moins de 20 kg d'uranium hautement enrichi (à plus de 80 % en ^{235}U) ou de quelques kilos de plutonium dit de « qualité militaire » (à plus de 90 % de ^{239}Pu) pour fabriquer une bombe, mais cela reste possible avec des quantités croissantes de matières moins enrichies. En particulier, le plutonium issu du retraitement civil des combustibles usés, dit de « qualité réacteur », est utilisable pour la fabrication d'une bombe.

Il faut également souligner le potentiel que représentent les matières non nucléaires pour l'utilisation par des terroristes de bombes radioactives dites « sales », basées sur la dispersion de la radioactivité grâce à un engin explosif conventionnel.

Le tableau ci-dessous présente un résumé, nécessairement simplificateur au regard de l'extrême diversité des radionucléides à prendre en compte, de l'échelle de dangerosité des grandes catégories de matières selon quelques critères essentiels.

Tableau simplifié de la dangerosité intrinsèque des matières concernées

	Radioactivité ^(b)	Radiotoxicité ^(b, c)	Tox. chimique ^(b)	Criticité	Détournement ^(d)
Uranium (U)	●	●	●●	●●●	●●●
Plutonium (Pu)	●●	●●● à ●●●●	●●	●●●●	●●●●
Actinides mineurs (AM)	● à ●●●●	● à ●●●●	●●	● à ●●	●●
Produits de fission (PF)	● à ●●●●	● à ●●●	○ à ●●●●	○	●●

(a) On distingue ici quatre grandes catégories de matières présentes dans le combustible irradié et les divers produits issus de sa gestion : l'uranium (plusieurs isotopes), le plutonium (plusieurs isotopes), les actinides mineurs et les produits de fission. On distingue cinq niveaux de dangerosité : ○ nulle, ● faible, ●● modérée, ●●● forte et ●●●● très forte.

(b) On compare ici la radioactivité, la radiotoxicité et la toxicité chimique des matières sur des unités de masse équivalentes.

(c) On ne tient compte que des principaux isotopes en termes de quantités mises en jeu.

(d) On indique ici quel usage « militaire » pourrait être fait après détournement des matières considérées (sous certaines conditions, notamment selon les formes sous lesquelles elles pourraient être accessibles) : on indique un danger très fort pour les matières utilisables dans une bombe nucléaire, modéré pour les matières utilisables dans une bombe « sale ». On ne tient pas compte d'exceptions telles que le neptunium (AM), qui peut être utilisé pour fabriquer une bombe nucléaire, ou le deutérium et le tritium (PF), matières indispensables à la fabrication de certaines armes nucléaires.

L'option française du « retraitement-recyclage »

L'uranium naturel est composé de 0,7 % d'²³⁵U et de 99,3 % d'²³⁸U. La filière à eau sous pression utilisée en France (REP) utilise un combustible à uranium enrichi en ²³⁵U (4 %). Une fois irradié dans les réacteurs ce combustible contient, dans des proportions variables, différentes matières nucléaires : tout l'²³⁸U, de l'²³⁵U, du plutonium (Pu), et différents produits dits d'activation et de fission résultant des réactions nucléaires en chaîne. Il comporte à la fois des éléments fortement radioactifs et des éléments radioactifs à très longue durée de vie, qui rendent sa gestion, dite « aval du cycle », extrêmement difficile.

Il existe aujourd'hui parmi les exploitants du nucléaire deux stratégies pour gérer le combustible usé : son maintien « en l'état », dit stockage direct, ou son retraitement. La France poursuit cette seconde voie, qui consiste à séparer, via un procédé physico-chimique complexe, les composants du combustible nucléaire irradié (uranium, produits de fission, plutonium et autres transuraniens).

Une fois séparés, les différents éléments sont gérés de façon dissociée en vue soit de leur réutilisation, soit de leur stockage comme déchets. Dans l'état actuel des techniques industrielles, seules les matières énergétiques – uranium et plutonium, respectivement 95 % et 1 % environ du contenu d'un combustible irradié standard – sont réutilisables. Les actinides mineurs et les produits de fission, considérés dans l'état actuel des technologies comme des déchets ultimes, sont vitrifiés et conditionnés pour un stockage définitif ultérieur.

Les objectifs du retraitement-recyclage

Le retraitement a d'abord été développé pour extraire des combustibles irradiés le plutonium, indispensable aux armes atomiques. Puis au cours des années soixante-dix, la séparation du plutonium est devenue la finalité du retraitement « civil », qui s'inscrivait dans le développement d'une filière « plutonium », utilisant les surgénérateurs (réacteurs à neutrons rapides type Superphénix) pour économiser les ressources naturelles en uranium et éviter la présence de plutonium dans les déchets finals (celui-ci pouvant en théorie être indéfiniment réutilisé). Mais l'absence de tensions sur l'uranium et l'abandon des surgénérateurs ont réduit l'intérêt de cet usage des matières nucléaires. Pour recycler partiellement le plutonium, l'industrie a développé un nouveau combustible, mélange d'environ 95 % d'uranium et 5 % de plutonium appelé MOX (mixed oxides) pour les réacteurs classiques (réacteurs à eau sous pression d'EDF).

Le bilan du retraitement-recyclage

EDF décharge chaque année de son parc nucléaire environ 1 150 tonnes de combustible irradié, dont 1 050 tonnes d'oxyde d'uranium (UOX) et 100 tonnes de MOX. EDF fait retraiter chaque année à La Hague, l'usine de retraitement française, 850 tonnes d'UOX et fabrique à Marcoule, l'usine de production de combustible MOX, 100 tonnes de ce combustible. Entre 16 et 18 réacteurs (sur 20 autorisés), tous de puissance 900 MWe, sont en moyenne chargés en combustible MOX dans une proportion maximale de 30 %.

Malgré cet usage, le stock de plutonium séparé a commencé à croître avec l'introduction de MOX dans le parc, et progresse parallèlement depuis. Le stock français de plutonium séparé et non réutilisé en réacteur atteignait 48,1 tonnes fin 2003 (auxquelles s'ajoutent 30,5 tonnes de plutonium étranger). Le stock d'uranium issu du retraitement, dont l'inventaire n'est pas connu, augmente régulièrement lui aussi.

D'autre part, l'évaluation du bilan matières du parc nucléaire actuel sur l'ensemble de sa durée de vie montre que la stratégie retraitement et MOX ne réduit que de 20 % la quantité de plutonium finalement accumulée (comme le montre le rapport Charpin Dessus Pellat « Etude économique prospective de la filière électrique nucléaire »),

Un tableau des matières nucléaires compliqué par le choix du retraitement-recyclage

Dans le cas du *stockage direct*, les déchets de moyenne activité à vie longue (dits de catégorie B) et de haute activité (dits de catégorie C) sont essentiellement de deux types :

- Les déchets B liés à l'exploitation du parc de réacteurs et des installations associées, indépendamment des choix sur le combustible,
- Le combustible uranium usé, ou irradié, considéré directement comme un déchet C. Ce combustible, contient diverses matières radioactives formées au cours de son irradiation.

Dans le **cas du retraitement-recyclage**, à ces deux catégories s'ajoutent :

- Des déchets B spécifiques au retraitement, principalement les gaines métalliques des crayons combustibles, et les déchets issus des procédés chimiques de traitement,
- Des déchets C également spécifiques au retraitement, les colis de verre enfermant le contenu non valorisable du combustible usé,
- Les produits issus de la réutilisation du plutonium sous forme de MOX (5 % à 10 % de plutonium incorporé dans une matrice d'uranium. Irradié, le MOX contient encore 3 % à 8 % de plutonium, quelques pourcents de produits secondaires, et le reste d'uranium). S'y ajoutent les rebuts de fabrication,
- Le combustible issu de la réutilisation éventuelle de l'uranium de retraitement, combustible URE (uranium ré-enrichi) irradié,
- Les déchets issus du démantèlement des installations de retraitement,
- Et enfin les matières nucléaires « valorisables » séparées (stocks de plutonium et d'uranium de retraitement en attente d'une réutilisation prévue ou « différée »).

Pour concentrer le volume des déchets ultimes les plus actifs, le retraitement multiplie donc les catégories de matières nucléaires et de déchets à gérer : le volume global des déchets à vie longue et des ouvrages de stockage associés peut se révéler supérieur au volume nécessaire pour le stockage direct des combustibles usés. Il en est de même pour les délais d'entreposage avant stockage éventuel des déchets. C'est le cas pour le MOX irradié, dont le dégagement thermique est beaucoup plus élevé que celui de l'UOX irradié et impose un refroidissement séculaire avant stockage.

Les risques spécifiques et les contradictions de l'industrie du retraitement-recyclage

L'industrie du retraitement et du MOX (et éventuellement à plus long terme du recyclage de plutonium et d'actinides dans des réacteurs rapides), élargit considérablement le catalogue de matières issues des réacteurs, multiplie les manipulations et les transports de ces matières et impose la mise en place d'installations industrielles à risques de séparation et de fabrication de combustibles.

Le complexe industriel nécessaire, aujourd'hui, les usines de La Hague (retraitement) et Melox (fabrication de combustibles à Marcoule), à l'avenir un complexe beaucoup plus étendu pour la fabrication des combustibles pour les RNR, induit des risques nouveaux de plusieurs types :

- Ceux liés aux rejets radioactifs des installations, plusieurs milliers de fois supérieurs à ceux d'une centrale nucléaire ;
- Ceux liés à la sécurité d'installations qui concentrent des stocks importants de matières nucléaires et qui supposent des transports fréquents entre usines ;
- Ceux liés à l'augmentation des risques de prolifération engendrée par l'extraction et le transport du plutonium.

Enfin, la stratégie de retraitement recyclage actuelle, qui implique la vitrification des actinides mineurs et des produits de fission, est totalement contradictoire avec celle d'une future éventuelle incinération de ces mêmes déchets puisqu'on considère aujourd'hui comme impraticable la reprise ultérieure des matières contenues dans les verres des colis.

Matières « valorisables » et déchets « ultimes », une frontière floue

Parmi les différentes matières nucléaires liées au système électro-nucléaire, en circulation ou stockées, et qui présentent toutes des risques de nature et d'intensité diverses, les pouvoirs publics et l'industrie ont pris l'habitude de distinguer les matières dites « valorisables » et les matières considérées comme définitivement inutilisables, les déchets « ultimes ».

Cette définition très étroite de la notion de déchet, réduite à celle des « déchets ultimes », n'est évidemment pas neutre : elle permet notamment de passer sous silence le caractère éventuellement dangereux de l'ensemble des matières nucléaires valorisables qui circulent ou se cumulent avant le stade « ultime » alors que les échéances de ce stade peuvent atteindre 50 à 100 ans.

La distinction entre matières valorisables et déchets est largement artificielle et ceci pour trois raisons :

D'abord parce que, comme dans toute technologie, cette distinction dépend des conditions techniques et économiques du moment. C'est le cas des actinides mineurs par exemple, aujourd'hui considérés comme des déchets ultimes et qui deviendraient des matières valorisables en cas de succès des technologies de transmutation.

Mais aussi parce que le statut des matières en question peut changer brutalement en fonction des stratégies de production. Donnons en un exemple : le plutonium extrait du retraitement des combustibles usés peut être considéré comme une matière valorisable tant que des réacteurs capables de l'utiliser existent et fonctionnent. En cas d'arrêt de la production, le stock de plutonium existant change brutalement de statut et devient un déchet ultime.

Enfin parce que, en attendant leur valorisation éventuelle, les matières dites valorisables peuvent présenter des risques analogues, voire supérieurs, à ceux des déchets dûment reconnus comme tels.

Pour envisager une gestion durable des déchets, il faut donc prendre en compte dans le débat, en plus des déchets reconnus comme tels, les matières classées aujourd'hui comme « valorisables », mais dangereuses en attendant cette valorisation éventuelle.

La définition générale des déchets ultimes et matières valorisables fait appel à une notion de « conditions techniques et économiques du moment » qui s'applique mal aux délais très longs de gestion des matières nucléaires. Pour le long terme, la distinction est donc d'abord politique : ainsi les combustibles du réacteur à neutrons rapides Superphénix sont entreposés sur le site en vue d'un retraitement prévu au plus tôt en 2035 – un objectif théorique qui permet en fait de repousser la décision sur leur véritable statut.

Dans la situation actuelle, le parti-pris de récupération des matières valorisables, qui conduit à poursuivre le retraitement et l'accumulation de plutonium, n'est cohérent que dans une hypothèse implicite de renouvellement du parc nucléaire : le parc actuel, ne permettra pas en effet de « recycler » les quantités de matières projetées comme le montre le tableau de la page suivante.

Les projections à 2020 réalisées par l'ANDRA sur la base d'une poursuite du rythme actuel, montrent en effet une augmentation globale des stocks dits « valorisables » qui progressent ou se stabilisent par catégorie. Dans le même temps, une estimation des capacités du parc à « absorber » effectivement ces matières montre un quasi-épuisement de la disponibilité des réacteurs utilisables à cette fin.

L'escamotage d'une partie du bilan des matières du cycle nucléaire, effacé par l'administration et l'industrie au nom de son potentiel énergétique futur est donc dangereuse puisqu'elle donne une image faussée de la réalité des risques pour la santé, la paix et l'environnement que fait peser sur la population le système électro-nucléaire actuel et son évolution.

Point et projection à l'horizon 2020 des principaux stocks « valorisables »

Stock « disponible » ^(a)	1987	1997	2002	2010	2020
Combustible UOX irradié	3 050 t	9 020 t	10 350 t	11 250 t	10 850 t
Combustible MOX irradié	0 t	195 t	520 t	1 300 t	2 350 t
Combustible URE irradié	0 t	0 t	150 t	350 t	700 t
Uranium de retraitement	~ 7 500 t	~ 12 000 t	16 000 t	20 000 t	25 000 t
Plutonium séparé ^(b)	2,5 t	38 t	48 t	~ 48 t	~ 48 t
Disponibilité de réacteurs ^(c)	25 à 35 ans	15 à 25 ans	10 à 20 ans	2 à 12 ans	0 à 2 ans

(a) Stocks estimés sur la base d'une poursuite des paramètres d'exploitation actuels (réacteurs et usines du cycle).

(b) L'ANDRA indique pour 2010 et 2020 un « stock stable » sans en préciser la valeur.

(c) Le calcul présenté ici traduit le nombre d'années d'exploitation moyen restant, à la date concernée, pour les 28 réacteurs 900 MWe (mégawatts électriques) d'EDF techniquement aptes à la « valorisation » (en l'occurrence l'utilisation du MOX) et deux valeurs de durée de vie, celle initialement prévue (30 ans), et de 40 ans, visée aujourd'hui par EDF.

Source : d'après Rapport annexe Charpin-Dessus-Pellat, « Parc nucléaire actuel », 2000 ; Inventaire national ANDRA, 2004

Les éléments d'un bilan exhaustif

La durée de vie (c'est-à-dire en fait le rythme de décroissance de leur radioactivité) et l'activité (le type et l'intensité de leurs rayonnements) ne sont pas les seuls éléments à prendre en compte pour un tableau complet des déchets. L'ensemble de leurs caractéristiques physico-chimiques, qui déterminent à la fois les conditions techniques de leur gestion et les risques associés, doivent être considérés : plus ou moins grande stabilité physique et chimique, dégagement thermique, criticité, etc.

L'inventaire des déchets et matières nucléaires réalisé par l'ANDRA, qui les classe en catégories présentant des « caractéristiques homogènes », en dénombre ainsi une centaine (hors matières valorisables), dont trente de déchets B et C.

Il faut pour obtenir un bilan exhaustif, garder à l'esprit l'existence de ces multiples catégories, en considérant que chacune pose des problèmes techniques spécifiques qui peuvent être extrêmement complexes, indépendamment des volumes considérés.

Enfin, au-delà des grandes familles de déchets et matières valorisables présentées ci-dessus, il ne faut évidemment oublier ni les *déchets issus de la recherche et développement*, ni les *déchets générés par l'ensemble de chaque filière* qui produit des déchets spécifiques, ni les *déchets étrangers* issus des services de retraitement aux électriciens européens et japonais, ni les *déchets militaires*.

Quels principes pour gérer les déchets à vie longue ?

De la dangerosité à la gestion des risques

Pour être traduite en risque, la dangerosité intrinsèque des matières doit être croisée avec des scénarios possibles d'exposition (par irradiation ou contamination), déterminés par les conditions de gestion des déchets et matières valorisables. On distingue en particulier :

- Les **conditions normales** : elles induisent des expositions directes à la radioactivité, par proximité avec les colis ou via des rejets de fonctionnement. Ces expositions sont en principe maintenues à des niveaux sensiblement inférieurs aux limites réglementaires d'exposition des travailleurs et des populations ;
- Les **conditions accidentelles** : elles peuvent avoir des causes internes (criticité, explosion chimique, échauffement...) et/ou externes (séismes, inondations, accidents de la route...). La **sûreté** vise à les maîtriser en renforçant les systèmes de protection (barrières de confinement), de contrôle et de sauvegarde pour maintenir en dessous d'un niveau jugé admissible la probabilité de scénarios entraînant de fortes expositions ;
- Les **actions malveillantes** : elles peuvent viser soit à disperser les matières radioactives concernées (agression terroriste, bombe sale), soit à s'emparer des matières nucléaires (prolifération). La **sécurité** vise, par conception, à rendre, par diverses protections, ce type d'action impraticable.

Les moyens mis en œuvre pour réduire les risques d'exposition (confinement, protection physique, etc.) sont dimensionnés pour maintenir, dans certaines conditions jugées significatives parmi celles ci-dessus, les niveaux d'exposition en dessous de seuils définis comme admissibles par la réglementation. Ceci doit en général être démontré par une évaluation des niveaux d'exposition et des conséquences sanitaires associées, qui repose sur des méthodes et des mesures complexes et discutées.

L'évaluation des risques liés à la gestion actuelle ou future des déchets, comme des risques associés à l'industrie nucléaire en général, est donc controversée. Des éléments aussi fondamentaux sur le plan méthodologique que l'existence d'une relation linéaire sans seuil entre les expositions à la radioactivité et les conséquences sanitaires (danger des faibles doses), la pertinence de l'approche probabiliste (non prise en compte d'événements jugés a priori trop rares) ou la définition des menaces terroristes de référence (niveau crédible d'engagement en hommes et en matériels) font l'objet de débat – et avec eux l'appréciation globale des risques posés par les déchets.

Sans entrer dans cette discussion, on peut procéder par comparaison pour constater que toutes les solutions de gestion des déchets ne sont pas équivalentes sur le plan des risques. Typiquement, les opérations qui visent à réduire l'inventaire à long terme des déchets se traduisent par un système de gestion plus complexe, donc des risques accrus à court terme.

Par exemple, la vulnérabilité (la facilité avec laquelle un scénario d'accident ou de malveillance se produit) et la sensibilité (l'ampleur des conséquences du dit scénario) sont très variables selon le type de matières en jeu et leur conditionnement. Ainsi, étant donné la très forte radiotoxicité du plutonium par inhalation (les stocks de plutonium séparé entreposé sous forme de poudre à La Hague, par exemple, représentent de quoi tuer plusieurs dizaines de fois, s'il était également réparti en fractions inhalées par les habitants, l'ensemble de la population française) ou son intérêt pour la fabrication d'armes, le plutonium séparé sous forme de poudre d'oxyde ou enfermé dans la matrice d'un combustible irradié, chaud et très radioactif présentent des risques très différents. Ou encore, le combustible MOX irradié, plus chaud et radioactif du fait de sa composition différente, pose des problèmes plus complexes que le combustible UOX irradié.

Les principes d'une gestion globale des matières et des risques

Les stratégies de gestion des déchets peuvent combiner des efforts pour réduire la dangerosité intrinsèque (en jouant sur l'inventaire des matières) ou pour réduire les risques d'exposition (en jouant sur les conditions de confinement des matières). Le tableau d'ensemble des risques associés doit tenir compte du fonctionnement normal, des accidents et des questions de sécurité, à chaque étape de traitement de l'ensemble des déchets et matières valorisables considérés aux différentes échelles de temps engagées.

À défaut d'établir ce tableau global, quelques principes peuvent être soulignés.

- La **minimisation des risques** par la mise en œuvre aussi tôt que possible de solutions efficaces de conditionnement et d'entreposage. La recherche des solutions les plus pertinentes à long terme, ou les délais de dizaines d'années nécessaires au refroidissement de certaines matières, ne doivent pas empêcher

une gestion la plus sûre possible de l'inventaire en attente. C'est ainsi que les solutions hautement radioactives de résidus du retraitement sont vitrifiées « en ligne », plutôt que conservées sous forme liquide dans l'attente d'éventuelles solutions de transmutation. En revanche, de nombreux déchets moins actifs sont aujourd'hui entreposés dans des conditions moins satisfaisantes : ainsi, selon l'ANDRA, deux tiers des volumes de déchets entreposés à La Hague fin 2000 n'étaient pas ou insuffisamment conditionnés. Ce problème concerne des déchets A mais également d'importantes quantités de déchets B, notamment 9300 m³ de boues issues des procédés anciens de retraitement (dont une partie provenant de combustibles étrangers).

- L'optimisation, ou la *cohérence des solutions adoptées*. Il s'agit notamment de maîtriser les équilibres de flux pour éviter des stockages et manipulations inutiles, contrairement à ce qu'on observe aujourd'hui, en particulier sur le plutonium. Il s'agit également de maintenir une cohérence parfois difficile entre des modifications en amont (évolution des taux de combustion notamment) et leurs conséquences en aval du traitement du combustible.
- La *justification des options au regard de l'ensemble des risques aux différentes échelles de temps*. Par exemple, si le choix industriel du retraitement est vu comme une tentative de réduction de la radiotoxicité intrinsèque des déchets ultimes, sa mise en œuvre modifie profondément le tableau des risques : la réduction de risques potentiels visée à long terme entraîne des risques effectifs consentis à court terme (augmentation des rejets, des manipulations, des transports...). L'ensemble des transferts de risque correspondants (entre types de risques, entre sites, entre générations) doit être explicité, évalué et justifié. En particulier, on ne peut pas se donner comme objectif de réduire la radiotoxicité à long terme sans traduire ceci en termes de risques d'exposition : le bilan doit porter sur une réduction des impacts liés aux relâchements du stockage à long terme contre une augmentation des impacts liés aux opérations en amont du stockage.
- La *réversibilité des options*, en particulier pour ne pas laisser s'installer des irréversibilités tant qu'on n'a pas choisi définitivement une option de gestion. Les solutions mises en œuvre à titre intermédiaire s'articulent en effet plus ou moins bien, notamment sur le plan technique, avec les différentes options envisageables à long terme. Par exemple, comparé à l'entreposage sécurisé en l'état des combustibles irradiés, le retraitement engage un certain nombre d'opérations futures (la reprise des stocks de plutonium séparé et d'uranium de retraitement) tout en fermant d'autres portes (les déchets vitrifiés ne sont pratiquement pas possibles à reprendre).

Quels indicateurs pour la gestion des déchets à vie longue ?

Devant la complexité du tableau des matières et des risques, il n'est pas facile de définir des indicateurs quantitatifs pour discriminer les stratégies envisagées.

D'une part, bien que couramment employés, certains indicateurs donnent une vision d'ensemble déformée. Ainsi les volumes de déchets, indicateur pertinent pour l'industriel qui réduit les coûts en minimisant l'emprise des colis, n'ont que peu de rapport direct avec leur nocivité : par exemple le compactage des déchets de moyenne activité, tel qu'il est mis en œuvre à La Hague, ne réduit en rien leur inventaire radioactif. De même la radiotoxicité des déchets, qui mesure une dangerosité intrinsèque mais ne rend pas compte des conditions potentielles d'exposition, est faussement représentative des risques associés.

D'autre part, les caractéristiques des matières évoluant dans le temps, l'évaluation du bilan des déchets et de sa réduction peut différer selon l'échelle de temps privilégiée.

Les indicateurs du bilan des matières

Dans la perspective d'une indication sur la réduction de l'inventaire des déchets à long terme, le critère de base doit être celui des quantités de matière en jeu. C'est le plus simple, et le plus fidèle à la réalité physique. On doit donc considérer les stocks et les flux, à un instant donné, d'une solution de gestion envisagée, en termes de tonnage des principales matières ou catégories de matières pertinentes pour le bilan des déchets hautement actifs à vie longue :

- Les matières nucléaires, *uranium* (U) et surtout *plutonium* (Pu). Ce dernier, par son statut ambivalent de ressource énergétique non conventionnelle ou de matière hautement toxique, est bien sûr central dans les comparaisons ;
- Les *actinides mineurs* (AM), tels que neptunium, américium et curium, éléments lourds générés par l'irradiation de l'uranium et du plutonium dans le combustible irradié (en fonction donc du type de combustible utilisé) ;
- L'ensemble des *produits de fission* (PF) générés par la réaction de fission, en particulier les produits de fission à vie longue. Ils ne jouent pas un rôle essentiel dans la radiotoxicité à long terme, mais sont déterminants pour le dégagement thermique (un colis vitrifié présente ainsi à sa sortie de chaîne une puissance thermique de 2000 W environ). Leur bilan dépend en premier lieu du rendement des réacteurs, et non des choix de combustible. Les quantités de produits de fission générées sont en effet directement proportionnelles à l'énergie thermique produite par fission du combustible. Rapportées à l'énergie électrique produite, leur quantité est d'autant plus faible que le rendement de conversion de la chaleur en électricité est élevé dans le réacteur.

Les indicateurs du statut des matières

Les stratégies envisagées pour la gestion des déchets à long terme conduisent, notamment pour celles qui déploient des filières visant à en réduire l'inventaire final, à une répartition très différente des matières considérées entre des stocks de statut distinct. Il faut de ce point de vue distinguer les matières qui sont considérées comme sorties du cycle, dans des entreposages en attente de stockage définitif en l'état, et celles qui restent dans le cycle, dans les réacteurs, les usines ou dans des entreposages en attente de reprise.

C'est le cas en particulier du plutonium, dès lors qu'une stratégie de retraitement est mise en œuvre, et des actinides mineurs dans d'éventuelles stratégies de transmutation à plus long terme. De fait, de telles stratégies nécessitent la circulation de flux importants de matières dont une partie ne peut pas être éliminée lorsque le système s'arrête, mais qui n'apparaît pas dans le bilan des déchets à un stade intermédiaire.

En plus des indicateurs sur les matières ci-dessus, il est utile de rendre compte spécifiquement des stocks de combustible irradié, en distinguant les cas du combustible à l'uranium et du combustible mixte uranium-plutonium pour tenir compte de leurs caractéristiques respectives (par exemple, le dégagement thermique beaucoup plus important des combustibles MOX irradiés).

Les indicateurs des déchets secondaires

Dans la perspective de la gestion à long terme des déchets radioactifs, l'attention se concentre sur les plus « forts » d'entre eux, les déchets hautement radioactifs à vie longue et l'inventaire des matières qu'ils contiennent. Les différentes opérations associées à l'utilisation et au traitement du combustible génèrent cependant, par irradiation de matériaux et surtout par contamination, d'importantes quantités de déchets moins radioactifs mais également à vie longue. Ces déchets secondaires posent des problèmes spécifiques et pas nécessairement plus simples de maîtrise des risques et leur inventaire ne peut être indifférent.

Il est très dangereux, comme le propose l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques [OPECST, 2005] d'isoler la réflexion sur les déchets hautement radioactifs de considérations sur les déchets de moyenne activité à vie longue. En effet, l'inventaire de ces derniers est très directement déterminé par les options retenues pour la gestion des déchets haute activité.

Ainsi, le retraitement des combustibles irradiés, tout en permettant la réutilisation éventuelle de l'uranium et du plutonium et en concentrant les actinides mineurs et les produits de fission dans les colis vitrifiés, conduit à des « pertes en ligne » de ces matières qui génèrent autant de déchets moyenne activité : coques et embouts du combustible conditionnés et entreposés en l'état, résidus de dissolution des matières contenues dans le combustible usé, filtres, etc. Il faudrait d'ailleurs ajouter à ces catégories de déchets solides les importants rejets gazeux et liquides de La Hague, dont l'émission « évite » autant de déchets.

La mise en œuvre d'options plus ambitieuses de réutilisation du plutonium (recyclage dans un parc de réacteurs à neutrons rapides) ou l'élimination des actinides mineurs se traduirait inévitablement par un accroissement des quantités de déchets moyenne activité à vie longue générées.

Comme pour les déchets hautement actifs, les indicateurs les plus neutres pour l'évaluation et la comparaison des options devraient porter sur le contenu en matières radioactives des déchets moyennement actifs à vie longue. On lui préfère toutefois généralement par commodité des estimations globales sur le volume de ces déchets.

Il faut noter enfin que, bien que n'étant pas pris en compte pour la gestion à très long terme des déchets, l'inventaire des déchets faible activité augmente également dans les options multipliant les opérations sur les produits liés aux combustibles.

Flux associés à la gestion actuelle

Après la montée en puissance de ses équipements (réacteurs de production et usines du « cycle » du combustible), le parc nucléaire français connaît depuis la fin des années quatre-vingt-dix une relative situation d'équilibre. Les flux annuels, du point de vue de la gestion des déchets à vie longue et des matières valorisables, sont pour le combustible du parc nucléaire français dominés par une option globale de retraitement et réutilisation des matières, dont la mise en œuvre n'est cependant que partielle.

EDF exploite un parc de 58 réacteurs totalisant une puissance installée de 63 000 MWe environ, répartis en 32 réacteurs de 900 MWe, 22 réacteurs de 1 300 MWe et 4 réacteurs de 1 450 MWe. Ce parc est alimenté chaque année par 1 150 tonnes environ de combustible, dont 1 050 tonnes de combustible à l'oxyde d'uranium (UOX) et de l'ordre de 100 tonnes de MOX utilisant du plutonium issu du retraitement. Le combustible MOX est utilisé, à raison de 30 % et 70 % d'UOX, dans 20 réacteurs du palier 900 MWe (les seuls spécifiquement autorisés sur 28 aptes à en recevoir).

La production du combustible UOX, enrichi en moyenne à 3,7 % en ^{235}U à partir d'uranium naturel à 0,7 %, génère environ 7 000 tonnes d'uranium appauvri à 0,25 % environ d' ^{235}U . La production de combustible MOX, outre le plutonium séparé (voir plus loin), permet la réutilisation de faibles quantités d'uranium appauvri (moins de 100 tonnes par an). Cette production engendre d'importantes quantités de rebuts, dont seule une partie limitée peut être réintroduite dans la chaîne de fabrication. La production annuelle de rebuts MOX, qui n'est pas publique, a fortement diminué, voire est nulle aujourd'hui : plus de 30 tonnes sont accumulées à La Hague mais il semble que ce stock n'augmente plus ces dernières années.

Le combustible séjourne, selon le niveau de taux de combustion autorisé dans les différents types de réacteurs, entre 3 et 4 ans dans le réacteur. Chaque année, une quantité de combustible irradié équivalente à la quantité de combustible chargé est déchargée des cœurs : 1 050 tonnes environ d'UOX usé et 100 tonnes de MOX usé.

Le combustible irradié est d'abord « refroidi » sur place, dans les piscines dont sont équipées chacune des centrales d'EDF, pendant 2 à 3 ans. Il est ensuite transporté à La Hague en vue de son retraitement. Sur 1 150 tonnes, environ 850 tonnes sont retraitées pour EDF chaque année, en moyenne après 9 ou 10 années de refroidissement (contre un délai théorique de 5 ans). Il s'agit aujourd'hui uniquement de combustible UOX, ce qui correspond à l'accumulation annuelle de 200 tonnes d'UOX et 100 tonnes de MOX « en attente » de retraitement différé.

Ces 850 tonnes produisent 8 à 9 tonnes de plutonium séparé et 800 tonnes d'uranium de retraitement. Un petit tiers de cet uranium de retraitement, après ré-enrichissement effectué en Russie (où le produit appauvri correspondant est abandonné), est utilisé sous forme d'un combustible appelé URE (uranium ré-enrichi) dans un à deux réacteurs d'EDF. Le plutonium entre pour 7 % dans la composition du MOX : 100 tonnes consomment donc 7 tonnes, le différentiel est selon les années comblé par légère augmentation du tonnage de MOX utilisé, par perte dans les rebuts ou par augmentation du stock de plutonium séparé « en attente ».

Le retraitement de 850 tonnes de combustible UOX génère de l'ordre de 90 m³ de déchets vitrifiés chaque année. Il produit également, à raison de 0,14 m³ et 0,55 m³ par tonne d'uranium respectivement, environ 110 m³ de déchets de coques et embouts compactés et 440 m³ de déchets de procédés, soit un total annuel de 550 m³ de déchets moyenne activité à vie longue.

Les flux annuels de matières valorisables et déchets à vie longue en France comportent également une partie non négligeable (que nous ne détaillerons pas ici) de produits liés d'une part aux activités de recherche et développement (réacteurs et ateliers), d'autre part aux activités de traitement en France de combustibles et matières nucléaires étrangers.

Les principales étapes du « cycle » du combustible en France

- L'extraction du minerai d'uranium ne se pratique plus en France.
- De même les usines de traitement du minerai pour le transformer en « yellow cake » ont toutes cessé leur activité. C'est sous cette forme que l'uranium correspondant aux besoins du parc français est aujourd'hui importé.
- La conversion de l'uranium consiste en deux opérations successives : la transformation du « yellow cake » en UF₄ (solide) par extraction chimique puis sa transformation en UF₆ (gazeux) par fluoration. Ces opérations sont réalisées par Comurhex respectivement dans ses usines de Malvési et Pierrelatte.

L'usine de Pierrelatte a produit en 2004 au total 129 t d' UF_4 et 170 t d' U_3O_8 .

- L'enrichissement de l'uranium, par diffusion gazeuse, est réalisé dans l'usine Georges Besse d'Eurodif au Tricastin.
- La déconversion de l'uranium appauvri, transformé d' UF_6 en U_3O_8 , composé solide stable, est réalisée par Cogema à Pierrelatte.
- Le stock tampon d' UF_6 pour les procédés de conversion, d'enrichissement et de déconversion est en permanence de l'ordre de 3 100 t d'uranium. Il pourrait tomber à 40 t seulement dans le cadre du projet de remplacement de l'usine Eurodif par une usine d'enrichissement utilisant la centrifugation.
- Après transformation de l'uranium enrichi sous forme d' UF_6 en poudre d'oxyde UO_2 , le compactage de cette poudre en pastilles et la réalisation d'assemblages combustibles de type UOX sont réalisés dans l'usine FBFC de Romans.
- Les 58 réacteurs exploités par EDF utilisent, selon leur puissance, entre 75 t et 100 t de combustible chargé en permanence, renouvelé tous les 12 ou 18 mois par tiers ou quart de cœur – ce qui correspond à un besoin global de l'ordre de 1 150 t de combustible neuf par an, et autant de combustible déchargé.
- Ces réacteurs sont répartis sur 19 sites dont partent et où arrivent donc les transports liés à l'approvisionnement en combustible depuis les usines de fabrication (Romans, Marcoule) et à l'évacuation du combustible après refroidissement de quelques années en piscines vers l'usine de retraitement de La Hague.
- Les réacteurs contiennent à tout moment un total de l'ordre de 5 000 t, auquel s'ajoutent environ 3 000 t de combustible présent dans les piscines des centrales.
- Le combustible irradié est entreposé dans les piscines de refroidissement sur le site des usines de retraitement Cogema de La Hague (anciennement UP2-400, aujourd'hui UP2-800 et UP3). Celles-ci retraitent aujourd'hui une partie seulement du combustible UOX irradié, dont elles séparent l'uranium de retraitement et le plutonium, conditionnés sous forme de poudre d'oxyde UO_2 et PuO_2 , et les déchets dits « ultimes ».
- La fabrication de combustible MOX, par compactage en pastilles d'une poudre mélangée d'oxydes UO_2 et PuO_2 , et assemblage des pastilles en crayons combustibles, est réalisée depuis 1995 par l'usine Cogema MELOX à Marcoule. Elle était également assurée, jusqu'en 2003, par l'ATPu à Cadarache.

Stocks de déchets entreposés pour stockage

On décrit ici les principales catégories de déchets hautement actifs et moyennement actifs à vie longue déjà conditionnés et entreposés dans l'attente d'une solution définitive – tels que recensés par l'inventaire national de l'Andra.

Déchets haute activité (HA)

Cette catégorie ne comprend à ce jour que les déchets vitrifiés issus du retraitement du combustible irradié. Il en existe trois types correspondant au retraitement de différents combustibles dans différentes usines (Marcoule puis La Hague) à différentes époques.

Le principal est formé des colis vitrifiés dits CSD-V produits par Cogéma à La Hague, qui enferment, calcinés et incorporés dans une matrice de verre, les produits de fission et actinides mineurs provenant des combustibles usés retraités. Ce verre est coulé dans des conteneurs standards inox. Le colis, un cylindre de 1,40 m de haut et 43 cm de diamètre, contient environ 400 kg de déchet dont 11 kg environ de produits radioactifs. Un colis correspond environ au retraitement de 1,35 tonne de combustible UOX. Outre leur intense dégagement radioactif, ces colis présentent un fort dégagement thermique (1 880 W par colis en moyenne à la production) appelé à augmenter dans les colis futurs avec l'augmentation des taux de combustion. Ils sont entreposés en puits ventilés à La Hague en attente de solution définitive.

Le second type est formé de l'ensemble des colis dits AVM, issus du retraitement, arrêté en 1987 (derniers fûts produits en 1997), des combustibles usés de l'ancienne filière UNGG (uranium naturel-graphite-gaz). Les verres, conditionnés en colis inox cylindrique de 1 m de haut et 50 cm de diamètre, pèsent 360 kg environ. Leur contenu radioactif et leur puissance thermique sont sensiblement inférieurs à ceux des colis vitrifiés issus du combustible UOX. Ils sont entreposés en puits ventilés dans des fosses à Marcoule.

Le troisième type correspond aux conteneurs inox de déchets vitrifiés dits PIVER, du nom de l'atelier pilote de vitrification à Marcoule où ils ont été produits entre 1969 et 1973 pour des combustibles dits Sicral de la filière UNGG puis en 1979 et 1980 pour des combustibles du réacteur à neutrons rapides Phénix. Beaucoup moins nombreux, ils sont également entreposés en puits ventilés à Marcoule.

Déchets moyenne activité à vie longue (MA-VL)

Les déchets de moyenne activité à vie longue sont plus nombreux et beaucoup plus variés : l'Andra en dénombre pas moins de 26 catégories dans son inventaire. 15 sont considérées comme déchets conditionnés et en attente de stockage (même si la définition des solutions futures n'exclut pas un éventuel reconditionnement). Ces déchets, dont certains représentent quelques dizaines de m³ contre quelques milliers pour d'autres, sont principalement de trois sortes, provenant essentiellement des activités de retraitement et de l'industrie du plutonium civil et militaire :

- Les déchets dits « coques et embouts » contenant les matériaux de gainage des crayons combustibles, issus du retraitement du combustible des réacteurs à eau pressurisée à La Hague. D'abord directement cimentés puis aujourd'hui compactés dans des fûts en inox, ces déchets sont entreposés sur le site de La Hague.
- Les boues de traitement des stations d'effluent des usines de retraitement (La Hague, Marcoule) et des centres d'études nucléaires du CEA (Cadarache, Valduc). Ces déchets sont actuellement entreposés sur les sites où ils ont été produits.
- Les déchets solides d'exploitation issus des usines de retraitement (La Hague, Marcoule, pour l'essentiel entreposés sur place) et des centres d'études nucléaires du CEA (rassemblés à Cadarache).

À ceux-ci s'ajoutent des sulfates de plomb radifères produits par l'usine d'extraction d'uranium du Bouchet, et des colis de sources scellées usagées anciennement stockés au Centre de stockage de la Manche et repris par l'Andra en raison de leur non conformité aux spécifications du centre. Ces deux lots de déchets sont actuellement entreposés au CEA Cadarache.

Déchets HA conditionnés, entreposés en attente de stockage

Type	Établissement ⁽¹⁾ / production	Colis	Volume ⁽²⁾ (m ³)	Activité ⁽³⁾ (Bq)		
				α	β, γ court	β, γ long
Actinides mineurs et produits de fission	Cogema La Hague En cours	verre borosilicaté, conteneur inox	938	1,210 ¹⁸	4,910 ¹⁹	1,410 ¹⁷
			<i>2920</i>	<i>3,910¹⁸</i>	<i>1,210²⁰</i>	<i>3,810¹⁷</i>
Actinides mineurs et produits de fission	Cogema Marcoule 1978-quasi arrêté	verre borosilicaté, conteneur inox	551	2,910 ¹⁶	5,410 ¹⁸	4,810 ¹⁶
			<i>551</i>	<i>2,610¹⁶</i>	<i>3,610¹⁸</i>	<i>4,110¹⁶</i>
Solutions de produits de fission	CEA Marcoule 1969-73, 1979-80	verre borosilicaté, conteneur inox	10	4,110 ¹³	2,810 ¹⁶	–
			<i>10</i>	<i>4,610¹³</i>	<i>1,810¹⁶</i>	<i>–</i>

Déchets MA-VL conditionnés, entreposés en attente de stockage

Type	Établissement ⁽¹⁾ / production	Colis	Volume ⁽²⁾ (m ³)	Activité ⁽³⁾ (Bq)		
				α	β, γ court	β, γ long
Coques et embouts	Cogema La Hague 1990-1995	cimenté, fût métallique	2277	3,210 ¹⁴	8,910 ¹⁶	6,310 ¹⁶
			<i>2277</i>	<i>3,510¹⁴</i>	<i>2,710¹⁶</i>	<i>5,610¹⁶</i>
Coques et embouts	Cogema La Hague 2002-...	compacté, conteneur inox	1166	3,910 ¹⁵	4,410 ¹⁷	1,510 ¹⁷
			<i>1166</i>	<i>1,610¹⁶</i>	<i>6,510¹⁷</i>	<i>2,810¹⁷</i>
Boues de traitement des effluents	Cogema La Hague 1989-quasi arrêté	enrobé bitumineux, fût inox	2380	2,310 ¹⁴	5,610 ¹⁵	3,010 ¹³
			<i>2380</i>	<i>2,710¹⁴</i>	<i>2,910¹⁵</i>	<i>2,610¹³</i>
Boues de traitement des effluents	Cogema Marcoule 1996-...	enrobé bitumineux, fût inox	421	2,210 ¹³	4,210 ¹⁵	3,510 ¹³
			<i>421</i>	<i>3,510¹³</i>	<i>3,110¹⁵</i>	<i>4,310¹³</i>
Boues de traitement des effluents	CEA Cadarache 1970-...	cimenté, fût métal, coque béton	2148	2,610 ¹⁴	1,210 ¹⁴	4,210 ¹²
			<i>2148</i>	<i>2,810¹⁴</i>	<i>6,210¹³</i>	<i>4,310¹²</i>
Boues de traitement des effluents	CEA Cadarache 1972-1982	cimenté, fût métal, surconteneur métal	44	3,310 ¹¹	1,310 ¹¹	2,110 ¹⁰
			<i>44</i>	<i>3,210¹¹</i>	<i>6,110¹⁰</i>	<i>2,010¹⁰</i>
Boues de traitement des effluents	CEA Valduc 1984-arrêté	cimenté, fût acier	81	3,510 ¹³	1,610 ¹¹	–
			<i>81</i>	<i>3,410¹³</i>	<i>1,010¹¹</i>	<i>–</i>
Déchets solides d'exploitation	Cogema La Hague 1990-1994	béton, conteneur amiante-ciment	360	1,610 ¹⁴	4,010 ¹⁴	1,610 ¹²
			<i>360</i>	<i>1,610¹³</i>	<i>2,310¹⁴</i>	<i>1,410¹²</i>
Déchets solides d'exploitation	Cogema La Hague 1994-...	cimenté, conteneur béton-fibres	4941	4,010 ¹⁴	1,210 ¹⁶	4,210 ¹³
			<i>4941</i>	<i>5,810¹⁴</i>	<i>8,510¹⁵</i>	<i>5,110¹³</i>
Déchets solides d'exploitation	Cogema Marcoule ...-2001	conteneur inox	25	1,010 ¹¹	1,710 ¹³	1,610 ¹¹
			<i>25</i>	<i>9,210¹³</i>	<i>1,110¹³</i>	<i>1,410¹¹</i>
Déchets solides d'exploitation	CEA Cadarache 1972-...	cimenté / bitumé, conteneur métal	4199	1,310 ¹⁵	1,110 ¹⁶	5,310 ¹²
			<i>4199</i>	<i>1,910¹⁵</i>	<i>8,110¹⁵</i>	<i>6,510¹²</i>
Déchets solides d'exploitation	CEA Cadarache 1970-...	cimenté / bitumé, conteneur métal	1387	5,210 ¹⁴	4,210 ¹⁵	5,510 ¹⁴
			<i>1387</i>	<i>4,010¹⁴</i>	<i>2,810¹⁵</i>	<i>7,210¹⁴</i>
Déchets solides d'exploitation	CEA Cadarache 1964-1987	ciment, coque béton, surconteneur métal	769	1,610 ¹⁰	7,810 ¹¹	4,410 ¹¹
			<i>769</i>	<i>1,610¹⁰</i>	<i>5,010¹¹</i>	<i>3,910¹¹</i>
Sulfates de plomb radifères	CEA Le Bouchet ...-1970	fût métallique, caisson béton	148	1,810 ¹³	1,010 ¹³	–
			<i>148</i>	<i>1,810¹³</i>	<i>5,810¹²</i>	<i>–</i>
Blocs sources	Andra 1972-1985	ciment, coque béton, conteneur métal	125	3,910 ¹²	5,010 ¹²	3,910 ¹⁰
			<i>125</i>	<i>3,910¹²</i>	<i>2,710¹²</i>	<i>3,710¹⁰</i>

(1) On indique ici l'origine de la production et/ou le propriétaire. Le site où les déchets sont entreposés peut être différent.

(2) On indique pour les déchets dont la production est achevée le volume total, pour ceux dont la production est en cours le volume fin 2002 et en italique le volume attendu à terme / en 2020.

(3) On donne pour l'ensemble des déchets la radioactivité en 2002 et en italique celle prévue en 2020

Stocks de déchets et matières en attente

D'importantes quantités de déchets radioactifs sont entreposées sous une forme insuffisamment conditionnée, voire non conditionnée et doivent faire l'objet d'une reprise en vue de leur stockage éventuel. Certains d'entre eux pourraient faire l'objet d'un traitement pour en extraire les petites quantités de matières « valorisables » qu'ils contiennent, et produire au passage des déchets. L'inventaire recense également des produits « valorisables » associés à la gestion du combustible et contenant les matières fertiles ou fissiles. Ils peuvent à terme devenir déchets ou relever de traitements produisant des déchets.

Matières « valorisables » en attente

On peut globalement distinguer trois catégories parmi ces matières, selon le degré de confiance sur leur réutilisation. Les chiffres ci-dessous sont les données observées par l'Andra fin 2002.

- Les « en cours » de production liés au fonctionnement normal du parc. C'est par exemple le cas de 3 100 t d'uranium présent dans les usines d'enrichissement ou 4 955 t de combustible en cours d'utilisation dans les réacteurs d'EDF.
- Les matières en partie réutilisées aujourd'hui mais pour lesquelles une inégalité de flux génère le doute sur une future réutilisation : ainsi 10 500 t de combustible irradié se sont accumulées, ainsi que 16 000 t d'uranium issu du retraitement, ou encore 48 t de plutonium séparé non réutilisé (le plutonium est stocké séparément mais aussi en partie dans des rebuts MOX) – pour les parts françaises.
- Les matières dont la réutilisation future reste théorique, sans réelle perspective : outre 520 t de MOX usé, on dénombre par exemple 75 t de combustible Superphénix (part française hors assemblages fertiles), 49 t combustible du réacteur prototype EL4, et respectivement 70 t et 30 t de combustibles de recherche du CEA civil et de combustibles de la Défense.

Déchets haute activité (HA) à (re)conditionner

Les déchets haute activité reconnus comme tels sont aujourd'hui les colis vitrifiés de solutions d'actinides mineurs et produits de fission issus du retraitement du combustible. A La Hague, le procédé minimise le volant de solutions liquides, par définition en attente de leur vitrification. Des résidus seraient par ailleurs à reprendre dans des cuves de l'usine de retraitement UP1 à Marcoule.

Mais le point principal dans ce domaine est l'entreposage, dans une cuve inox refroidie à La Hague, de solutions molybdiques de produits de fission issues du retraitement dans les années soixante de combustible spécifique dit UMo (uranium-molybdène) des réacteurs UNGG. Leur teneur en molybdène est en effet supérieure aux spécifications des colis de verre et nécessite la mise au point d'une technique alternative, dite « froide » de vitrification.

Déchets moyenne activité à vie longue (MA-VL) à (re)conditionner

Ce sont au total, fin 2002 et en prenant en compte les volumes correspondant à un conditionnement de ces déchets, 64 % des volumes existants de déchets MA-VL qui devaient être repris. Ces déchets se répartissent en 11 familles plus une qui rassemble des déchets « divers ». Les grands types en sont :

- Les déchets de structure des réacteurs (barres de commande, etc.) issus des 58 réacteurs d'EDF en exploitation plus ceux tirés du réacteur Superphénix, arrêté en 1997. Leur traitement est prévu par compactage et entreposage en conteneur inox standard, pour 30 % seulement d'entre eux en 2020 pour ces deux familles.
- Les déchets de structure du combustible (gainages, etc.) issus du retraitement de celui-ci. C'est le cas de déchets du retraitement du combustible UNGG à La Hague, où leur conditionnement visé est le même que pour les coques et embouts des réacteurs à eau pressurisée (avec une prévision de 20 % de réalisation en 2020), et à Marcoule, où leur reprise se ferait dans les conteneurs dits EIP, polyvalents et destinés à une installation en projet d'Entreposage intermédiaire polyvalent (avec 50 % de réalisation en 2020).
- Les boues de traitement des effluents, notamment des boues anciennes produites à La Hague, pour lesquelles un conditionnement par bitumage semblable aux boues actuelles est visé, et produites à Marcoule, pour lesquelles un reconditionnement en fûts EIP est prévu (avec respectivement 100 % et 50 % d'achèvement en prévision à l'horizon 2020).

- Les déchets solides d'exploitation, soit liés à d'anciennes activités à La Hague (reprise par cimentation dans des coques béton-fibre, prévision de 55 % réalisés en 2020) ou Marcoule (reconditionnement en fûts EIP, pour certains après cimentation), soit liés aux activités passées et présentes de fabrication du combustible MOX (prévision de conditionnement à La Hague par compactage en conteneurs standard inox).
- Les déchets à venir dans l'installation CEDRA, à Cadarache, qui doit être mise en service en 2008. Les boues y seront conditionnées pour entreposage en matrice vitreuse, et les déchets solides compactés en coques béton-fibres, tous conditionnés dans les mêmes conteneurs dit haute intégrité.
- Un nombre important de déchets divers, pas encore différenciés par l'inventaire, qui regroupe aussi bien des déchets hors structure de Superphénix que les déchets de futurs démantèlements EDF ou Cogema avant 2020 (1 500 m³ prévisionnels). La prévision est que 50 % de ces déchets soit conditionné en 2020.

Déchets HA et MA-VL mal ou non conditionnés

Type	Établissement ⁽¹⁾ / production	État	Volume ⁽²⁾ (m ³)	Activité ⁽³⁾ (Bq)		
				α	β, γ court	β, γ long
Solutions molybdène produits de fission	Cogema La Hague	Entreposé sous forme liquide	140	1,510 ¹⁵ <i>1,410¹⁵</i>	3,510 ¹⁷ <i>2,310¹⁷</i>	3,010 ¹⁵ <i>2,610¹⁵</i>
Déchets activés des réacteurs REP	Réacteurs du parc EDF	En l'état dans piscines	215 <i>320</i>	– –	1,210 ¹⁸ <i>4,610¹⁷</i>	4,510 ¹⁶ <i>7,010¹⁶</i>
Déchets activés des réacteurs RNR	Superphénix Arrêté	Non précisé	– <i>20</i>	– –	– <i>6,010¹⁴</i>	– <i>3,010¹⁴</i>
Déchets magnésiens des réacteurs UNGG	Réacteurs UNGG 1966-1980	Entreposé en silos La Hague	73 <i>73</i>	5,110 ¹³ <i>5,210¹³</i>	1,410 ¹⁵ <i>8,510¹⁴</i>	1,110 ¹³ <i>9,310¹²</i>
Déchets de structure combustible UNGG	Marcoule UP1 Arrêté	Entreposé en vrac sur site	<i>2270</i>	3,510 ¹⁴ <i>3,510¹⁴</i>	1,110 ¹⁷ <i>6,210¹⁶</i>	2,310 ¹⁵ <i>2,010¹⁵</i>
Boues de traitement des effluents	La Hague UP2-400 ...-1991	Entreposé en l'état en silos	<i>7616</i>	2,710 ¹⁵ <i>2,810¹⁵</i>	6,510 ¹⁶ <i>3,910¹⁶</i>	4,110 ¹⁴ <i>3,610¹⁴</i>
Boues de traitement des effluents	Cogema Marcoule 1966-87, 1987-96	Fûts bitumés	<i>10 190</i>	2,610 ¹⁴ <i>2,810¹⁴</i>	4,910 ¹⁶ <i>3,110¹⁶</i>	8,310 ¹⁴ <i>8,010¹⁴</i>
Déchets pulvérulents	Divers Arrêté	Entreposé en l'état en silo La Hague	<i>1 286</i>	2,310 ¹⁴ <i>2,610¹⁴</i>	4,910 ¹⁵ <i>1,910¹⁵</i>	1,710 ¹⁴ <i>1,710¹⁴</i>
Déchets solides d'exploitation	Cogema Marcoule Arrêté	Conteneurs provisoires sur site	<i>784</i>	1,310 ¹⁴ <i>1,310¹⁴</i>	3,610 ¹⁵ <i>1,510¹⁴</i>	2,810 ¹⁵ <i>2,510¹⁵</i>
Déchets pulvérulents	Traitement Marcoule Arrêté	Entreposé en vrac sur site	<i>1 150</i>	1,710 ¹⁴ <i>1,810¹⁴</i>	3,010 ¹⁵ <i>1,710¹⁵</i>	8,710 ¹¹ <i>8,710¹¹</i>
Déchets solides contaminés alpha	Essentiellement Marcoule MELOX	Entreposé en fûts sur les sites	51 <i>165</i>	3,410 ¹⁴ <i>1,310¹⁵</i>	5,810 ¹⁵ <i>1,110¹⁶</i>	4,510 ⁹ <i>1,410¹⁰</i>
Boues de traitement et déchets solides	CEA Cadarache Futur CEDRA	Déchets à venir	– <i>780</i>	– <i>2,710¹⁴</i>	– <i>5,510¹⁴</i>	– –
Déchets divers	Divers existant, futur démantèlement	Entreposés sur les sites concernés	1 237 <i>2 740</i>	1,010 ¹⁵ <i>2,010¹⁵</i>	1,010 ¹⁶ <i>2,010¹⁶</i>	1,010 ¹⁵ <i>2,010¹⁵</i>

(1) On indique ici l'origine de la production et/ou le propriétaire.

(2) Volume estimé des colis de déchets une fois le conditionnement effectué ou en l'état du processus de reconditionnement en 2020.

(3) On donne pour l'ensemble des déchets la radioactivité en 2002 et en italique celle prévue en 2020.

Les principes et lacunes de la loi de 1991

L'origine de la loi de 1991

La loi connue sous le nom de « loi Bataille », du nom de son rapporteur à l'Assemblée nationale, est intervenue en 1991 pour résoudre une situation totalement bloquée en France – comme dans d'autres pays – sur la gestion des déchets hautement radioactifs.

Les débats menés au sein de l'industrie nucléaire en concertation avec la puissance publique avaient conduit, au début des années quatre-vingt, à conclure que ces déchets devaient inévitablement faire l'objet d'un stockage géologique et à lancer des recherches sur l'identification et la validation des meilleurs sites dans différents types de formations rocheuses sur le territoire national.

Face aux blocages politiques et devant les oppositions très fortes des populations locales refusant l'enfouissement des déchets, le Gouvernement décida en 1989 un moratoire sur la procédure de recherche de sites. La France, l'un des principaux utilisateurs du nucléaire – et donc producteurs de déchets – au monde, se trouvait ainsi sans aucune perspective de programme pour la gestion des plus problématiques de ces déchets.

La loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (*Journal Officiel*, n° 1 du 1^{er} janvier 1992, récemment codifiée sous la forme des articles L.542-1 et suivants du *Code de l'environnement*), adoptée à l'unanimité par l'Assemblée nationale comme par le Sénat, visait donc essentiellement à proposer un cadre législatif – dans un pays où l'activité nucléaire en général en manque singulièrement – apportant suffisamment de garanties pour la reprise d'un tel programme.

Les principales dispositions de la loi

Elle établit d'abord un principe de droit essentiel en affirmant que « *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. 1er).

Elle introduit ensuite pour les déchets nucléaires (et par extension pour tous « *produits dangereux* ») une double condition réglementaire pour tout « *stockage souterrain en couches géologiques profondes* » (art. 2) : d'une part, il est obligatoirement soumis à autorisation administrative, d'autre part, cette autorisation ne peut avoir qu'une validité limitée dans le temps. Sur ce point essentiel dans la problématique de réversibilité ou non des installations, la loi renvoie à plus tard toute décision sur une durée illimitée : « *les conditions et garanties selon lesquelles certaines autorisations peuvent être accordées ou prolongées pour une durée illimitée (...) seront définies dans une loi ultérieure* » (autrement dit les conditions d'autorisation d'un stockage géologique définitif).

Autre principe essentiel, la loi s'oppose à la gestion définitive en France de déchets radioactifs issus de producteurs étrangers : tout en prenant acte du développement de contrats de retraitement pour le combustible irradié d'électriciens européens ou japonais, la loi impose que « *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. 3).

La partie la plus visible de la loi concerne l'organisation des recherches sur la gestion des déchets (comme le précise son titre, son objet est bien celui-là et non la gestion elle-même de ces déchets). Elle fixe d'abord les grands axes d'un programme de recherche (généralement dénommés axe 1, 2 et 3) :

- « *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.* » (art. 4)

Mais elle établit également, dans le même article, un cadre pour l'évaluation, le contrôle et la validation de ces recherches : elle oblige le Gouvernement (qui a respectivement confié le pilotage des axes 1 et 3 et de l'axe 2 au CEA et à l'Andra) à remettre chaque année un rapport d'avancement au Parlement, qui doit en saisir l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST). Elle crée pour établir ces rapports, publics, une Commission nationale d'évaluation (CNE) composée de spécialistes. Elle donne enfin un délai de 15 années maximum, ce qui nous amène à l'échéance de 2006, au

Gouvernement pour remettre au Parlement un rapport global d'évaluation accompagné d'un projet de loi.

La loi introduit ensuite un certain nombre de dispositions d'ordre plus technique dont les principes restent cependant essentiels. En premier lieu, elle donne un statut juridique spécifique et établit la procédure d'autorisation « *des 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* ». (art. 5 et suivants). Elle précise notamment les conditions de concertation avec les populations locales et interdit la présence de sources radioactives dans ces laboratoires autres que temporaire à des fins d'expérience.

Elle permet de plus de constituer des groupements d'intérêt public (GIP) pour l'accompagnement économique des territoires sur les sites des laboratoires. Elle impose parallèlement la création, autour de chaque laboratoire souterrain, d'un comité local d'information et de suivi (CLIS) composé d'élus nationaux et locaux et de représentants de la société civile (associations, syndicats ; etc.).

Enfin, la loi transforme l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), qui était jusque-là un département du CEA, en établissement public industriel et commercial (statut EPIC) indépendant, définit sa tutelle gouvernementale (ministres en charge de l'industrie, la recherche et l'environnement) et établit ses missions, notamment : participation aux recherches, gestion de tout stockage définitif de déchets radioactifs, et inventaire exhaustif des déchets radioactifs présents sur le territoire national.

Les principales lacunes de la loi

Arrivé à l'échéance des 15 années prévues à l'origine, outre les difficultés spécifiques dans la mise en œuvre et les avancées des recherches prévues (voir fiche 11), le cadre établi en 1991 montre un certain nombre de lacunes.

La plus grave, car elle atteint la légitimité même du processus, est l'impossibilité dans laquelle les pouvoirs publics se sont trouvés d'implanter plus d'un laboratoire de recherche souterrain, alors que la loi en prévoit explicitement plusieurs. Après la désignation d'un site en argile dans la Meuse, à Bure, et l'abandon du second site envisagé dans le Gard, l'échec de la « mission granite » de concertation pour désigner malgré tout un second laboratoire en massif granitique pose un problème fondamental : comment le Parlement pourrait-il, s'il abandonnait le projet d'un second laboratoire en 2006, conserver la confiance des populations en ne respectant pas la règle qu'il s'est lui-même fixée ?

Les autres problèmes concernent plutôt l'absence de définitions rigoureuses nécessaires, dans un domaine éminemment technique, à l'application de certains principes posés par la loi. Il en va ainsi d'abord de l'acception même des « *déchets à haute activité et à vie longue* » qui sont au cœur de la loi. Son périmètre est généralement considéré comme celui des déchets dits haute activité (HA) d'une part, et moyenne activité à vie longue (MA-VL) d'autre part. Mais l'OPECST restreint aujourd'hui son champ aux seuls déchets HA. À l'inverse, pourquoi les déchets à vie longue, même faiblement actifs, n'entreraient-ils pas dans le champ de la loi ?

La loi reste également trop floue sur la question des déchets étrangers. Malheureusement, ni les débats du Parlement ni aucun texte réglementaire n'ont établi ces « délais techniques », dont une interprétation très extensive, en amont (entreposage du combustible dans les piscines) comme en aval (entreposage des déchets issus du retraitement), est aujourd'hui pratiquée par Cogema à La Hague. De plus, la loi ne fixe pas de cadre à la pratique contractuelle de Cogema consistant à faire des « swaps » (échanges) d'unités de radioactivité entre clients, et conduisant à ce que chaque client ne récupère pas réellement les déchets physiques liés à son combustible mais un équivalent calculé par l'exploitant de La Hague.

Des recherches non conclusives

Les recherches menées sur les trois axes définis par la loi de 1991 n'apportent pas de résultats suffisants pour engager rapidement des décisions de gestion : l'entreposage de longue durée apparaît réalisable, mais on ne dispose que de résultats préliminaires sur le stockage géologique, et d'aucun élément tangible sur la faisabilité industrielle de la séparation-transmutation. En parallèle, l'apport indispensable des sciences humaines sur des dimensions sociales ou éthiques a été totalement négligé. La connaissance économique reste également insuffisante, privant la réflexion d'une analyse sur les coûts et bénéfices comparés des options.

L'année 2006 marque l'échéance de quinze années d'efforts (et bien d'autres auparavant) menées dans le cadre de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs. Une nouvelle loi, portant non plus sur la recherche mais sur la gestion de ces déchets, doit être examinée dans le courant de l'année 2006.

La loi de 1991 fixait trois axes de recherche, portant respectivement sur le tri des matières contenues dans les déchets et la réduction sélective de leur nocivité (axe 1, séparation-transmutation), l'enfouissement en profondeur des déchets, réversible ou irréversible (axe 2, stockage géologique), et le conditionnement et la surveillance dans des installations de surface (axe 3, entreposage de longue durée).

Les avancées obtenues dans ces différentes voies sont de nature inégale. La réflexion a par ailleurs évolué sur leur articulation, depuis leur compétition vers leur complémentarité.

- **L'entreposage de longue durée** est, de très loin, la voie la plus avancée en terme de faisabilité. On estime aujourd'hui que des entreposages à l'échelle d'un siècle, éventuellement renouvelables sont réalisables et peuvent être opérationnels à court terme. Le peu d'intérêt des industriels pour cette solution, perçue comme un intermédiaire évitable vers les solutions définitives, a cependant entraîné des retards dans les recherches de cet axe, ne permettant pas la validation définitive de cette option.
- Les recherches sur le **stockage géologique** sont restées très en deçà du programme initial. Elles ont en particulier failli sur un point essentiel, politique et non scientifique : alors que la loi de 1991 prévoyait « plusieurs laboratoires », théoriquement destinés à tester des milieux géologiques différents (argile et granit), un seul a finalement été implanté, dans l'argile de Bure.

Les travaux de creusement du laboratoire ont eux-mêmes pris du retard – au point que le laboratoire en lui-même n'est pas terminé, même si les galeries creusées ont déjà permis la mise en place d'expérimentations – et la recherche mise en œuvre reste donc extrêmement préliminaire.

Si aucun élément rédhibitoire n'est apparu à ce stade, ce que l'ANDRA traduit par une « faisabilité de principe », de nombreuses recherches restent nécessaires pour qualifier cette solution.

Ainsi, la qualification détaillée du secteur de Bure, après caractérisation de la couche hôte et de ses propriétés de confinement, doit être précisée dans la durée par les expérimentations prévues *in situ*. L'analyse des perturbations par les travaux et le stockage, et l'ingénierie déployée pour limiter ces perturbations, reste trop limitée. Les éléments techniques sur le contenu prévisible d'un stockage ou les critères établissant sa sûreté, garantissant son niveau d'impact sur l'environnement ou encore définissant sa réversibilité, restent beaucoup trop imprécis pour optimiser la conception d'un dépôt.

Le processus est donc beaucoup moins avancé que ne le prévoyait le législateur en 1991. Il pourrait de plus, malgré la confiance affichée, buter sur un certain nombre d'obstacles.

En parallèle des expérimentations, très peu a été fait sur l'élaboration de critères d'acceptabilité d'un futur stockage éventuel (par exemple, la limitation de l'impact à démontrer), ou de critères plus opérationnels comme la définition de son éventuelle réversibilité. Des points importants d'incertitude demeurent, qui nécessiteront plusieurs années d'études et dont la conclusion reste ouverte : il s'agit par exemple du degré de migration de radionucléides clés (diffusion, réactions géochimiques, etc.) et de l'estimation de leur temps de transfert jusqu'aux exutoires naturels, du comportement hydro-thermo-mécanique de la roche, du suivi de la « zone endommagée de creusement » (EDZ) et de son évolution, des perturbations géochimiques apportées par le béton et les structures métalliques, ou encore du comportement des gaz et notamment du problème de génération d'hydrogène par corrosion des aciers.

- La **séparation-transmutation**, dont certains font l'objectif ultime de la gestion des déchets, reste extrêmement hypothétique. Si des avancées importantes ont été obtenues sur la séparation, on reste toutefois loin d'une démonstration de faisabilité industrielle globale pour l'ensemble des matières concernées.

Mais c'est la transmutation qui pose le plus problème. Les recherches dans cette voie, en France comme

à l'étranger, ont seulement démontré la faisabilité d'expériences de transmutation, à l'échelle de petites « cibles » correctement placées dans des réacteurs. La faisabilité industrielle suppose le passage de deux sauts qualitatifs dont rien ne permet de préjuger aujourd'hui : celui d'une cible à un cœur de réacteur, et celui d'un réacteur à un parc optimisé de multiples réacteurs dont on sait maîtriser les flux dans la montée en puissance, l'équilibre puis la phase d'arrêt.

L'attrait pour cette solution se fonde essentiellement sur des « démonstrations » de son efficacité qui, dans une forme tautologique, font en réalité l'impasse sur sa faisabilité : des scénarios mettant en œuvre des machines capables, par hypothèse, de réduire les déchets par transmutation... aboutissent effectivement à une réduction.

La Commission nationale d'évaluation a d'ailleurs pointé dans son dernier rapport ces carences, concluant clairement « *qu'il n'y aura pas en 2006 d'arguments décisifs pour prendre une décision de nature scientifique, technique ou industrielle sur la transmutation* ». La CNE affirme notamment que « *la transmutation est un espoir qui repose sur des machines qui n'existent pas à ce jour* » et que « *le CEA fonde de grands espoirs sur le RNR-gaz (...) mais ce réacteur n'est qu'à l'état de concept. La CNE ne dispose d'aucun élément d'appréciation quant à sa faisabilité et à ses performances de transmutation.* »

Dans ces conditions, c'est la pertinence même du maintien de cette option dans un panel de solutions réalistes qui doit être posée.

Les résultats des recherches menées à ce jour restent largement insuffisants pour conclure et engager des décisions en 2006 sur la gestion finale des déchets. Et si les voies de recherche ouvertes doivent être poursuivies, des objectifs précis doivent leur être fixés par rapport à la question prioritaire de démonstration de faisabilité.

Il faut de plus regretter la faiblesse des recherches développées dans le domaine des sciences humaines : absentes du programme initial de la loi, elles le sont encore du bilan final, alors même que leur contribution est essentielle pour sortir du débat technique d'experts et prendre en compte les dimensions sociales ou éthiques du problème. Aucune réflexion de cet ordre ne figurait par exemple dans le colloque-bilan sur les « Recherches sur les déchets nucléaires – Acquis et perspectives à l'échéance de 2006 » organisé le 30 juin 2005 à Paris par le Ministère délégué à l'enseignement supérieur et à la recherche.

De même, la dimension économique n'est absolument pas développée. Il est à peu près admis que des solutions plus complexes, comme la séparation-transmutation, représentent un surcoût par rapport à des stratégies d'entreposage longue durée et même de stockage géologique – surcoût théoriquement associé au bénéfice de réduction de l'inventaire des déchets. Toutefois, aucun élément de certitude ou presque n'existe aujourd'hui sur les coûts réels attendus (voir fiche 19), empêchant tout développement sérieux d'analyses de type coûts/bénéfices des différentes gestions.

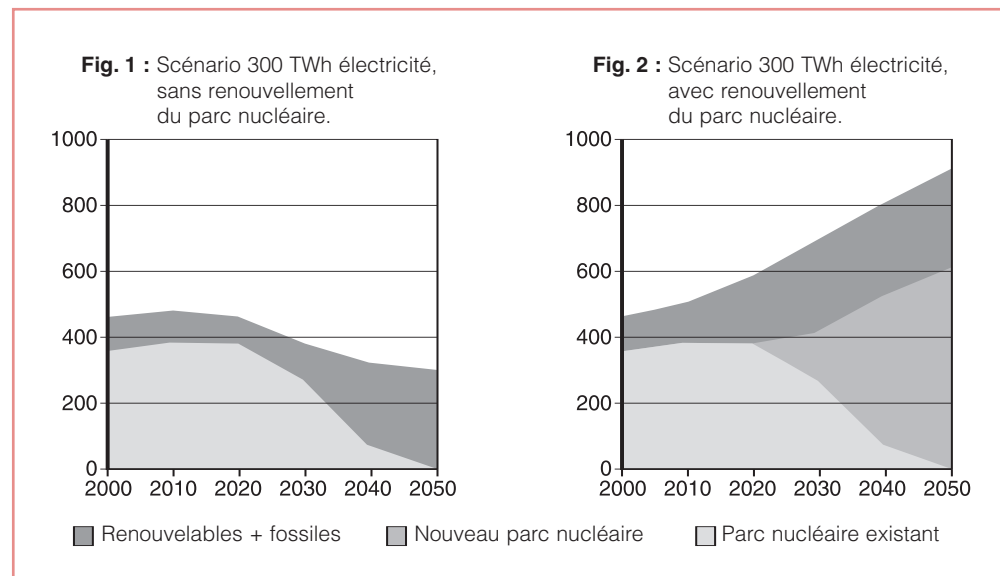
Les stratégies de production d'électricité

Scénarios de production d'électricité

L'un des arguments souvent présenté par les tenants du nucléaire est que « le coup est parti » : « de toutes façons, nous dit-on, le parc actuel a déjà produit une quantité non négligeable de différents déchets. Et, sauf à interrompre brutalement la production des centrales avant leur fin de vie, une quantité supplémentaire s'y ajoutera d'ici 2040 ou 2050, date d'extinction naturelle du parc actuel. Dans ces conditions, le niveau de production du parc, en cas de poursuite de l'option nucléaire, n'aura qu'une influence marginale sur la situation à long terme; seules les technologies mises en œuvre sont de nature à modifier significativement la situation des déchets ».

Pourtant toutes les analyses montrent bien que l'avenir de la production nucléaire, dans le cadre d'une évolution globale des besoins électriques, est un élément déterminant pour la gestion des déchets. À partir de nombreuses études de prospective énergétique disponibles pour la France, on peut retenir deux visions contrastées pour l'option nucléaire, conduisant à une sortie en fin de vie du parc actuel ou une poursuite de la progression d'ici 2050. La première s'inscrit dans une vision énergétique à long terme d'évolution tendancielle des consommations d'énergie et de poursuite d'une production électrique très concentrée telle qu'elle est illustrée par le scénario « tendanciel » de la Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières du ministère de l'industrie. La seconde s'inscrit dans une vision de la réussite d'une politique axée sur la division par 4 à l'horizon 2050 des émissions de gaz à effet de serre dues à l'énergie, en s'appuyant délibérément sur la minimisation de la production centralisée d'électricité au profit de la production locale. Les scénarios du rapport Charpin, Dessus, Pellat, « demande basse » ou le scénario Négawatt sont des illustrations de cette vision de l'avenir

Deux scénarios encadrant l'évolution des moyens de production d'électricité



Les options énergétiques et électriques dans lesquelles s'inscriront les stratégies de gestion des déchets ont non seulement une action directe sur les bilans matières, mais aussi un effet d'entraînement sur les évolutions possibles à très long terme. Il ne s'agit pas ici de trancher entre stratégies énergétiques sur un critère restrictif de gestion des déchets, mais de montrer à l'inverse comment les choix de politique énergétique, qui prennent en compte bien d'autres critères, conditionnent cette gestion. Ces stratégies ont bien entendu des conséquences diversifiées sur le recours aux énergies fossiles, renouvelables et nucléaire, donc sur les émissions de gaz à effet de serre et les déchets nucléaires.

On se place dans l'hypothèse généralement retenue où l'énergie nucléaire, lorsqu'elle est maintenue, couvre 50 % à 65 % des besoins d'électricité centralisée (une production en base ou semi-base). Les figures 1 et 2 décrivent alors sommairement les deux extrêmes dans la fourchette de possibilités pour la production d'électricité de 2000 à 2050.

Dans le scénario le plus consommateur, le recours à l'électricité nucléaire pourrait atteindre environ 600 TWh, avec un besoin complémentaire de 300 TWh d'électricité renouvelable ou fossile, dans le scénario à plus bas profil le besoin de nucléaire pourrait évoluer de 200 TWh à zéro. On pourra remarquer à ce propos que le scénario le plus consommateur d'électricité suppose la mise en place de capacités fossiles ou renouvelables aussi importantes que le scénario le plus sobre même dans l'hypothèse où ce dernier n'utilise plus d'énergie nucléaire.

Dans ce cadre et en fonction des stratégies technologiques choisies (voir fiche 18) on peut apprécier l'évolution des différents bilans (stocks et flux) des principales matières ou catégories de matières pertinentes pour le bilan des déchets B et C définies plus haut (fiche 7) et qui sont rappelées ci-dessous :

- Les matières nucléaires, *uranium* (U) et surtout *plutonium* (Pu)
- Les *actinides mineurs* (AM) ;
- L'ensemble *des produits de fission* (PF) générés par la réaction de fission, en particulier les produits de fission à vie longue ;
- Les stocks de combustible irradié, en distinguant le combustible à l'uranium et le combustible mixte uranium-plutonium qui posent des problèmes de gestion différents (voir fiche 04).

Cette analyse fait l'objet des trois fiches (14, 15 et 16) qui suivent.

Le croisement scénarios énergétiques - stratégies technologiques

Les stratégies technologiques

Le second paramètre d'évolution des flux et stocks de matières nucléaires dangereuses, à évolution donnée de la production nucléaire, est la nature des technologies nucléaires mises en œuvre d'ici la fin du siècle. Pour illustrer la diversité des stratégies techniques envisageables, nous avons retenu ici trois types de filières nucléaires :

- Les filières de réacteurs à eau, comme les réacteurs français actuels. À combustible UOX ou MOX, ils ont en commun des températures modestes, des neutrons lents et des rendements limités (de 33 à 36 %), qui conduisent à la constitution de stocks croissants de plutonium, d'actinides mineurs et de produits de fission dans les combustibles usés. Ces réacteurs sont aujourd'hui massivement déployés, et leur évolution est déjà prête, comme le projet *EPR (European pressurised water reactor)*.
- Les filières à plus haute température qui bénéficient d'un meilleur rendement thermodynamique (jusqu'à 50 %), telles que le *HTR (high temperature reactor)* actuellement à l'étude. Ces réacteurs, plus petits, sont notamment développés pour incinérer le plutonium militaire et/ou produire directement de l'hydrogène. Le retraitement de leur combustible n'est pas envisagé. Prévus pour une disponibilité industrielle vers 2020-2030, ils peuvent consommer du plutonium, produisent relativement peu d'actinides mineurs et, grâce à leur rendement plus élevé produisent peu de produits de fission.
- Enfin, des réacteurs également à haute température, plus éloignés en termes de R&D, regroupés sous les nouvelles filières *RNR (réacteurs à neutrons rapides)*. Ils n'existent aujourd'hui que sur le papier, et pourraient être disponibles vers 2040 ou 2050. Leur combustible devra par conception pouvoir être retraité. Les performances visées devraient idéalement permettre de consommer non seulement le plutonium mais aussi des actinides mineurs tout en réduisant la production de produits de fission.

Filières retenues et fonctionnement attendu des réacteurs correspondants

Filières	Disponibilité	Combustible	Plutonium ^(a)	Actinides mineurs ^(a)	Produits de fission ^(a)
EPR (eau pressurisée)	2012-2015	UOX et MOX ^(b)	n.d.	+25 kg/TWh	+120 kg/TWh
HTR (haute température)	2020	non retraitable	-110 kg/TWh	+12 kg/TWh	+90 kg/TWh
RNR (neutrons rapides)	2040-2050	retraitable	-60 kg/TWh	-10 à -15 kg/TWh	+80 kg/TWh

(a) Le mode de fonctionnement (et le bilan) peut pour chacune des filières varier selon le type de combustible utilisé et les objectifs. Ces variations peuvent être très fortes : les RNR peuvent par exemple être utilisés pour générer du plutonium. On indique ici quel fonctionnement est retenu pour le calcul des bilans de scénarios.

(b) On retient l'hypothèse d'une reconduction dans un parc EPR du fonctionnement des réacteurs « moxés », (une utilisation de 70 % d'UOX et 30 % de MOX) et une progression des taux de combustion pour atteindre à terme 64 GWj/t pour l'UOX et 55 GWj/t pour le MOX.

Source : Rapport annexe Charpin-Dessus-Pellat, « La prospective technologique de la filière nucléaire », 2000.

Les scénarios retenus

Pour illustrer la nature et l'ampleur des enjeux dans quelques situations caractéristiques, nous avons choisi 6 scénarios croisant des hypothèses diverses de production d'électricité et de technologies mises en œuvre. Leurs principales caractéristiques apparaissent dans le tableau ci dessous :

Caractéristiques principales des scénarios

Scénarios		Hypothèses électriques		Hypothèses technologiques	
Production nucléaire	Technologies nucléaires	Evolution du parc	Production nucléaire en 2050	Nouveaux réacteurs ^(a)	Traitement combustible
❶ Poursuite	Continuité	Poursuite du nucléaire	600 TWh	EPR (2020)	Retraitement
❷ Poursuite	Rupture			EPR (2020)	Séparation
❸ Maintien	Rupture	Maintien	350 TWh	RNR (2040)	transmutation
❹ Sortie	Continuité	Sortie du nucléaire	0 TWh	Aucun	Retraitement
❺ Sortie	Rupture			HTR (2025)	Retraitement
❻ Sortie	Abandon			Aucun	Aucun

(a) Nouveaux réacteurs introduits en remplacement ou complément du parc ; entre parenthèses date où commence l'introduction.

Le parc installé en 2050 représente 85 GWe (gigawatts électriques) pour 600 TWh (térawatt-heures), 47 GWe pour 350 TWh, et 12 GWe pour les réacteurs HTR.

Par comparaison, le parc de 58 réacteurs exploité par EDF actuellement représente 63 GWe et génère environ 450 TWh.

- deux scénarios de *poursuite* de l'option nucléaire (renouvellement et accroissement du parc de réacteurs), soit dans une *continuité* technologique [❶] soit avec une *rupture* par introduction d'une nouvelle filière RNR [❷] ;
- un scénario de *maintien* de l'option nucléaire (renouvellement partiel avec repli du parc), et la même *rupture* technologique que précédemment [❸] ;
- trois scénarios de *sortie* de l'option nucléaire (non renouvellement à la fin de vie du parc actuel (on opte ainsi pour une évaluation conservatrice des bilans de scénarios d'arrêt du nucléaire, basés sur la même hypothèse de durée de vie du parc que les scénarios de renouvellement, soit 45 ans par réacteur en moyenne). Ils se distinguent sur la gestion du combustible : *continuité* de la gestion actuelle [❹], introduction d'une *rupture* technologique [❺], ou *abandon* de la stratégie de retraitement [❻].

Cette sélection ne s'appuie pas sur un critère de probabilité d'occurrence ou de représentativité des multiples options envisageables. Les scénarios choisis ont seulement vocation à illustrer les principaux enjeux des décisions à prendre sur la production et les technologies nucléaires, en comparant l'évolution des matières nucléaires dangereuses à gérer pendant un siècle dans quelques situations caractéristiques.

Bilan des matières nucléaires des scénarios

Les courbes ci dessous montrent l'évolution des quantités des principales matières nucléaires depuis 2005 jusqu'à 2110, date à laquelle le nouveau parc d'EPR remplaçant le parc actuel arriverait en fin de vie. Les résultats qui suivent sont par construction *optimistes* et *très incertains* puisque les scénarios décrivent le fonctionnement optimal de parcs exploitant des machines idéales telles qu'elles existent sur papier; ils sont aussi *incomplets* car ils ne prennent pas en compte de nombreuses catégories de déchets, (notamment les déchets B issus du retraitement) et ne rendent pas compte d'aspects qualitatifs tels que la forme dans laquelle se trouvent stockées les matières considérées.

L'inventaire plutonium + actinides mineurs (Pu + AM) (figure 3)

De grandes divergences apparaissent entre les scénarios. La stratégie la plus efficace pourrait être d'associer au non renouvellement du parc existant, la mise en route de réacteurs HTR incinérateurs de plutonium [⑥], qui ferait chuter l'inventaire de Pu + AM à une valeur résiduelle de l'ordre de 300 tonnes dès 2080, (dont une centaine de Pu) tout en produisant sur la période environ 3500 TWh d'électricité ou de l'hydrogène pour les transports. Les courbes montrent d'autre part l'énorme inertie du système : en pariant sur la réussite complète du programme de transmutation le plus ambitieux, l'inventaire du scénario 600 TWh [②] tombe certes à une valeur de 400 t, analogue à l'inventaire de 2020, vers 2080, mais pour remonter en 2110 à la valeur de l'inventaire laissé par le premier parc en 2050 [④], trois fois supérieur à l'inventaire actuel.

Les produits de fission (PF) (figure 4)

Là encore les bilans sont très diversifiés : une multiplication par 2,5 de l'inventaire entre 2005 et 2110 dans le scénario de sortie avec abandon du retraitement [⑥], une multiplication par 6,8 dans le scénario de poursuite et de continuité [①]. L'introduction de RNR [②/③] n'est pas du tout suffisante pour maîtriser l'évolution des produits de fission : en 2110, et à condition que les délais proposés soient respectés, la quantité de produits de fission oscillerait entre 5800 et 4500 t alors qu'elle n'atteindrait que 2500 t en 2045 à la fin de vie théorique du parc actuel. La stratégie de mono-recyclage du plutonium couplée au non-renouvellement du parc [⑤] conduit à une augmentation plus modérée (+ 20 %) des produits de fission.

L'inventaire des combustibles irradiés MOX (figure 5)

La plus mauvaise stratégie est très nettement la poursuite de la stratégie actuelle, avec des EPR utilisant du MOX sans retraitement de celui-ci [①], qui conduit à entreposer jusqu'en 2250 environ de l'ordre de 13000 t de MOX irradié, contre 2000 t jusqu'en 2200 pour le scénario de non renouvellement sans incinération ni retraitement [⑥] et de moins de 200 tonnes pour le scénario avec incinération du plutonium [⑤]. Les scénarios de recours aux RNR ne sont pas déterminants, avec respectivement 1000 t [③] et moins de 2000 t [②] en 2110.

L'inventaire des combustibles irradiés UOX (figure 6)

On considère enfin l'inventaire de combustible UOX irradié laissé en l'état, fonction inverse du degré de poursuite du retraitement. Comme pour le MOX, les résultats sont très contrastés. Le scénario d'arrêt du retraitement provoque bien sûr une augmentation importante du stock d'uranium irradié à gérer avec 40000 t [⑥]. Ce bilan tombe au contraire à zéro si le non renouvellement du parc est couplé avec un programme d'incinération du plutonium [⑤]. Le scénario d'introduction d'un parc HTR est le plus efficace pour les stocks d'UOX et de MOX irradié, qu'il élimine. Ceci se traduit cependant par l'accumulation de combustible usé du parc HTR, considéré comme un déchet ultime du fait de la grande résistance de la matrice céramique du combustible utilisé.

Évolution des principaux inventaires selon les scénarios considérés de 2000 à 2110

Fig. 3 : Évolution de l'inventaire du plutonium sans emploi et des actinides mineurs.

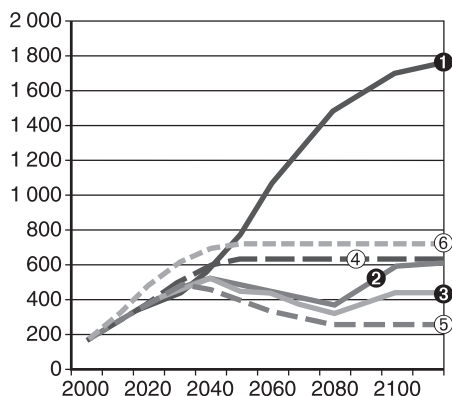


Fig. 4 : Évolution de l'inventaire de produits de fission^(a).

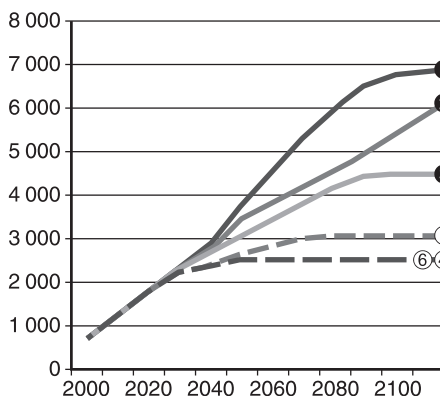


Fig. 5 : Évolution de l'inventaire de MOX irradié.

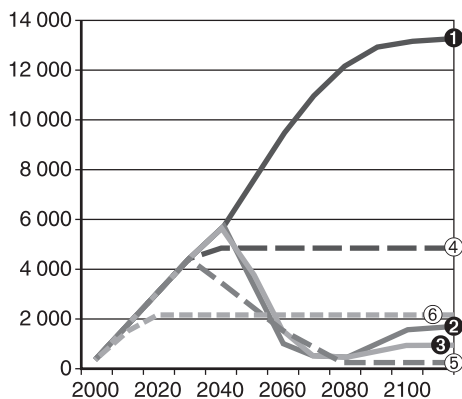
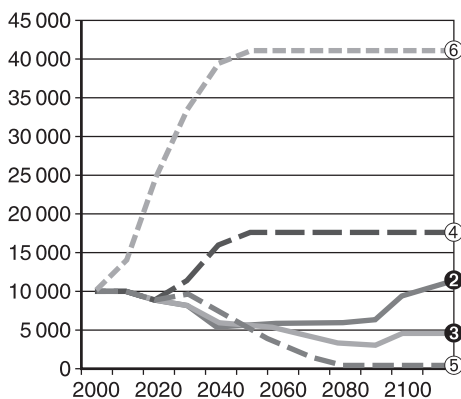


Fig. 6 : Évolution de l'inventaire d'UOX irradié^(b).



(a) Les résultats sur les produits de fission sont identiques pour les scénarios 4 et 6.

(b) Le scénario 1 (600 TWh EPR) n'est pas représenté pour l'inventaire d'UOX irradié faute d'information suffisante.

Source : D'après le rapport annexe au rapport Charpin-Dessus-Pellat sur « la prospective technologique des filières nucléaires », 2000.

Production nucléaire		Technologies nucléaires	
—	① Poursuite	—	Continuité
—	② Poursuite	—	Rupture
—	③ Maintien	—	Rupture
- - -	④ Sortie	—	Continuité
- - -	⑤ Sortie	—	Rupture
- - -	⑥ Sortie	—	Abandon

Que nous apprennent les scénarios ?

Les scénarios analysés nous apprennent tout d'abord que les stratégies de maîtrise de l'énergie et de production décentralisée, en permettant de limiter les besoins d'électricité et de ne pas renouveler le parc nucléaire en fin de vie (2045), (qui ne sont pas neutres sur le plan énergétique et induisent bien sûr d'autres types d'efforts en particulier une politique sérieuse de sobriété et d'efficacité électrique), conduisent à des bilans de matières nucléaires dangereuses *beaucoup plus faibles et surtout beaucoup plus tôt* (entre 2050 et 2080) que les stratégies de poursuite, qui supposent, quelles que soient les technologies utilisées, une très grande pérennité (plus d'un siècle) pour atteindre la même efficacité.

En cas de poursuite...

Le scénario de poursuite d'une prédominance nucléaire fondée sur un parc tout EPR [1] impose le maintien du retraitement pendant toute la période. Même si elle est gérée dans des conditions optimales, cette stratégie impose la gestion de stocks d'actinides mineurs, de produits de fission, et de MOX irradié en rapide croissance sur la période comme le montre le tableau ci-dessous. Cette accumulation de stocks croissants accompagne une extension de l'industrie du retraitement et des multiples risques spécifiques qui lui sont associés (voir fiche 4). Elle génère des quantités importantes d'uranium de retraitement à entreposer (11 000 t en 2004, plus de 40 000 t en 2050, probablement plus de 80 000 t en 2110) en attendant son usage éventuel. Par ailleurs, la sécurisation des stocks de produits de fission et d'actinides mineurs extraits du combustible irradié impose leur vitrification rapide et leur stockage définitif (quels qu'en soient les risques), ce qui est *tout à fait antinomique avec l'espoir de leur transmutation éventuelle* à long terme.

Bilans matières des scénarios de poursuite nucléaire

Scénarios de poursuite du nucléaire	2004 Parc actuel	2050		2110	
		① Continuité (EPR)	② Rupture (EPR+RNR)	① Continuité (EPR)	② Rupture (EPR+RNR)
Actinides mineurs	41 t	160 t	133 t	295 t	150 t
Produits de fission	900 t	3 700 t	3 430 t	6 820 t	5 800 t
MOX irradié	500 t	7 400 t	3 660 t	13 200 t	1 640 t

Le scénario qui substitue une partie des EPR par des RNR réalisant la transmutation [2] apporte à l'horizon du siècle *un gain majeur sur le MOX* (stocks finaux divisés par huit), *un gain appréciable sur les actinides* (division par deux) et nettement plus modeste sur les produits de fission (baisse de 20 %). Mais il soulève une série de questions.

- La réussite scientifique, technique, industrielle et économique, dans les délais, de la séparation-transmutation est un *pari* qui implique la possibilité d'un échec qui pourrait créer une situation plus difficile encore que celle du scénario précédent.
- La mise en place d'un « multirecyclage » et d'un parc RNR à l'échelle industrielle visée engendre des *risques* dont la maîtrise devient très difficile.
- Enfin, si le déploiement à partir de 2040 d'une industrie de séparation-transmutation s'appuie sur la poursuite d'ici là du retraitement, la prévention implique la vitrification des actinides mineurs (et produits de fission) ainsi générés, les soustrayant par là même à une future incinération puisqu'on considère aujourd'hui comme impraticable la reprise ultérieure des matières contenues dans les verres des colis.

Et en cas de non renouvellement du parc actuel ?

Les trois options de non renouvellement du parc actuel en fin de vie se distinguent par des gestions très différentes de l'héritage de matières issues de ce parc. Le tableau suivant en rappelle les conséquences en termes de bilan final, autour de 2045 ou de 2075 selon les cas.

Bilans matières en fin du parc actuel dans les scénarios de non renouvellement du parc

Scénarios de sortie du nucléaire	2004 Parc actuel	Fin ~2045 ④ Continuité (retraitement)	Fin ~2075 ⑤ Rupture (retraitement+HTR)	Fin ~2045 ⑥ Abandon (arrêt retraitement)
Actinides mineurs	41 t	112 t	145 t	112 t
Produits de fission	900 t	2500 t	3025 t	2500 t
MOX irradié	500 t	4835 t	190 t	2030 t
UOX irradié	n.d.	15600 t	190 t	41000 t

La première option [④] articule à deux horizons de temps des décisions incohérentes entre elles, consistant à accumuler des matières valorisables (poursuite du retraitement) pour renoncer ensuite à les valoriser (non renouvellement lorsque cette échéance se présentera). Elle prolonge les risques associés au retraitement, sans en tirer de bénéfice ; au contraire elle augmente considérablement les masses de MOX irradié à gérer.

L'option d'arrêt du retraitement [⑥], est plus cohérente. Elle réduit les risques avec la fermeture dès 2010 des usines de l'industrie du plutonium et l'arrêt des transports associés. Elle implique en revanche de consentir au futur stockage, réversible ou non, à la fois des matières et déchets hérités du retraitement (combustibles MOX en quantités importantes, déchets vitrifiés) et des combustibles UOX soustraits au retraitement. Elle suppose également une reprise, sans valorisation, des stocks d'uranium de retraitement et surtout de plutonium séparé subsistant en 2010.

La troisième option, plus audacieuse, consiste à faire le pari d'une réduction des matières issues du retraitement au-delà de la fin de vie du parc actuel dans un parc de réacteurs dédiés, de type HTR [⑤]. Elle présente l'avantage de faire tomber l'inventaire final de MOX irradié et de plutonium et d'actinides mineurs à des valeurs très faibles. De plus le combustible utilisé des HTR est particulièrement stable et ne suppose probablement pas d'opération supplémentaire avant stockage. Mais cette option suppose la pérennisation des opérations de retraitement pendant encore 60 ou 70 ans, avec les risques que cela comporte, et la mise en route et l'exploitation d'une petite série de HTR

Les trois options décrites ci-dessus présentent également, en termes de gestion, quelques caractéristiques communes. Elles font l'économie du développement incertain de la séparation-transmutation et déplacent le choix entre stockage réversible ou non, de considérations sur la possibilité de reprises des déchets vers des critères de confiance à très long terme sur la fiabilité du confinement. Enfin, elles présentent l'intérêt majeur de fixer dès aujourd'hui (à des niveaux divers) la quantité de déchets ultimes, alors qu'elle ne peut l'être dans aucun cas pour les scénarios de poursuite du nucléaire.

Moindre mal ou fuite en avant ?

Le tableau ci-dessous montre à l'évidence *qu'aucune des stratégies n'évite un certain nombre d'inconvénients à court, moyen ou long terme*. Leur nature et leur intensité sont néanmoins très variables.

Intensité des contraintes de gestion des différents scénarios sur les deux siècles qui viennent

Contraintes ^(a, b) Scénarios	Risque retraitement	Séparation transmutation	Entreposage MOX	Stockage déchets C	Stockage UOX
① Poursuite / continuité	●●●	●	●●●●	●●●●	●●
② Poursuite / rupture	●●●●	●●●●	●●	●●●	●●
④ Sortie / continuité	●●	Non	●●●	●●●	●
⑤ Sortie / rupture	●●●	Non	Non	●●	Non
⑥ Sortie / abandon	●	Non	●	●●	●●●

(a) On prend en compte les principales contraintes suivantes : la gestion des risques du retraitement-recyclage, l'obligation de réussite d'un programme de séparation-transmutation, la nécessité d'un entreposage de combustible MOX, d'un stockage de déchets vitrifiés (C), et d'un stockage de combustibles UOX

(b) On distingue quatre niveaux de contrainte : ● faible, ●● significative, ●●● forte, ●●●● majeure.

Mais la question principale, jamais abordée par les pouvoirs publics, qui émerge à la lecture de ce tableau, est celle des flux de plutonium et de ses descendants sous leurs différentes formes (séparées ou non) au cours des 100 années qui viennent.

On voit bien en effet que l'intensité des contraintes de gestion à terme séculaire est très directement liée à l'intensité des flux correspondants.

Les différentes stratégies de poursuite du nucléaire butent principalement sur cette question. Celles qui n'envisagent pas de rupture technologique majeure et se bornent au mono recyclage du plutonium sous forme de MOX butent sur les problèmes de gestion de ce combustible irradié. Celles qui acceptent le pari de la rupture technologique se heurtent dans un premier temps (jusqu'en 2050) au même problème tout en amplifiant considérablement les risques inhérents à l'industrie des combustibles.

Les stratégies de non renouvellement du parc permettent de quantifier précisément ces contraintes en fonction des stratégies techniques retenues et les allègent significativement dans tous les cas.

La fuite en avant

Bien qu'elle s'avère relativement inefficace en regard des problèmes de matières nucléaires dangereuses, la stratégie d'introduction d'un parc RNR pour assurer la transmutation à partir d'un parc EPR semble privilégiée par une partie des acteurs publics du débat.

Ce choix repose à la fois *sur des omissions majeures, sur une exigence implicite et sur un double pari* :

- Des *omissions majeures* puisque, en ne prenant en compte que les « déchets ultimes » les pouvoirs publics omettent de traiter une grande partie des problèmes que posent à moyen terme une série de matières nucléaires dangereuses pour ne se concentrer que sur des questions de très long terme.
- Une *exigence implicite* de poursuite d'une politique de production nucléaire à des niveaux élevés sur plus d'un siècle, sans laquelle les stratégies techniques préconisées se révèlent totalement contre performantes.
- Un *double pari*, celui de la réussite des recherches sur les réacteurs régénérateurs à haute température, le recyclage et la transmutation des actinides et des produits de fission, et celui de la possibilité réelle de mise en place, dès 2040, d'un système industriel complet que Robert Dautray décrit dans son récent rapport à l'Académie des sciences. (*Les isotopes du plutonium et leurs descendants dans le nucléaire civil*, mai 2005) :

Outre la réalisation d'un nouveau parc de réacteurs RNR de taille comparable à celui qui existe il faudrait, nous dit-il, :

- Des usines de fabrication et de refabrication continues de nouveaux combustibles utilisant les isotopes du Pu et leurs descendants très radioactifs,
- Des usines d'extraction mécanique et chimique continues de plutonium et de ses descendants pour fabriquer ces combustibles pour les RNR,
- Des outils de manutention robotisés pour la matière hautement radioactive (notamment pour se protéger des émissions de neutrons),
- Des moyens pour les transports continus entre toutes les usines, à moins qu'elles soient regroupées en un seul lieu où serait ainsi créé un complexe nucléaire,
- Des moyens pour assurer la sécurité, soit des transports entre les éléments du réseau d'usines soit du complexe. Ce dernier poserait des problèmes du type protection d'une forteresse avec un important personnel. Enfin, rejets et déchets, de toute nature, de ce complexe nucléaire poseraient mille problèmes.

On voit là apparaître la contradiction dans laquelle se sont placés les pouvoirs publics. Comme la maîtrise de l'inventaire du plutonium et des actinides mineurs est un passage obligé, dans la mesure où il n'est pas possible de présenter à l'opinion publique des inventaires de matières nucléaires dangereuses constamment croissants, ils sont contraints de présenter la stratégie de recyclage du plutonium et des actinides mineurs, quelles qu'en soient les difficultés, les délais et les chances réelles de succès. Certains promoteurs du nucléaire ont d'ailleurs tellement bien intégré cette exigence de succès qu'ils proposent le démarrage d'un vaste programme de réacteurs type EPR, destiné principalement à constituer le stock de plutonium indispensable à l'alimentation des nouveaux réacteurs des années 2050 !

Si tout va bien, si aucune faille, ni scientifique, ni technique, ni économique, ni politique, ne vient gripper la mécanique imaginée, si aucun retard n'est à déplorer, si l'acceptation sociale est acquise pour toute la période, alors, dans 100 ou 120 ans, nous pourrons revenir, après une période « transitoire » semée de risques et de dangers importants, à une situation analogue à celle que nous laisserait le parc d'aujourd'hui, si on le laissait vivre jusqu'à sa fin naturelle.

C'est dire l'ampleur du pari proposé par les tenants du nucléaire quand ils proposent, à l'appui d'une poursuite sur plus d'un siècle de la production nucléaire à des niveaux comparables au niveau actuel, de ne se reposer que sur les avancées éventuelles de la science et de la technique, sans jamais envisager d'autre stratégie et en particulier l'arrêt à terme du nucléaire.

Pourtant comme le dit encore Robert Dautray, « *c'est bien au citoyen de décider s'il veut garder pendant un nombre indéterminé et indéterminable de décennies le plutonium et ses descendants ou s'il veut faire un autre choix* ».

Quel processus de décision ?

Quel objet pour le débat ?

Le débat public, dans la forme institutionnelle qu'il connaît en France sous l'égide de la CNDP, va jusqu'à la mise en cause du projet et inclut la présentation des solutions alternatives. Certes, les déchets nucléaires ne constituent pas un « objet nouveau » : l'industrie nucléaire, tant civile que militaire, en a déjà produit en abondance. Mais ce n'est pas une raison suffisante pour que l'on ne discute pas de la poursuite de sa production. Ce ne serait pas la première fois dans la si jeune « ère industrielle » que l'on renoncerait à une technologie pourtant prometteuse du fait de l'importance des risques qu'elle présente.

Les « inconvénients » de l'utilisation de l'énergie nucléaire – notamment pour la production d'électricité – sont universellement reconnus : production de déchets radioactifs, risque d'accident et de prolifération. On ne peut donc refuser de prendre en considération l'opinion selon laquelle la production de déchets radioactifs est considérée comme un « inconvénient » dont la gravité doit conduire à l'abandon de la production d'électricité d'origine nucléaire.

La gouvernance traite des choix et des alternatives possibles et de la façon de prendre les décisions par un processus démocratique : l'option de non production des déchets radioactifs est une option de premier rang, exactement au même titre que celle qui prône que l'électronucléaire doit être une composante majeure du système énergétique français.

La question fondamentale posée par les déchets nucléaires est bien celle du « legs » aux générations futures, à une échelle presque « éternelle », de produits extrêmement dangereux fabriqués par l'homme et déposés par lui quelque part sur ou sous la terre avec un degré de protection qui ne peut être éventuellement garanti que dans l'état actuel des connaissances (physiques et d'ingénieur) : on voit bien que le débat est fondamentalement « politique » et concerne l'ensemble des citoyens.

Partager la connaissance : le rôle et la responsabilité de l'expertise

La question des déchets radioactifs, comme d'ailleurs celle du nucléaire en général, est très souvent présentée comme extrêmement complexe, voire incompréhensible. Le nucléaire ayant été et restant en grande partie un « domaine réservé » (en particulier mais pas seulement du fait de son utilisation à des fins militaires), il est exact que « le niveau de connaissance des Français sur ces sujets reste limité ». Dans un pays où le nucléaire a une place aussi importante dans la production d'électricité (80 %), on est effectivement surpris de la pauvreté et de la rareté des ouvrages existant en français sur le sujet, si l'on excepte les (rares) publications « orientées » issues des entreprises et organismes promoteurs. L'ignorance est soigneusement entretenue. D'où une forte tentation à prétendre que le débat se limite de fait à une confrontation entre « ceux qui savent » (majoritairement issus des organismes promoteurs) parés de la sacro-sainte « rationalité » et « ceux qui ne savent pas », le « grand public », avec un grain de condescendance vis-à-vis de cette catégorie vaste et indistincte, porteuse de surcroît d'une douteuse « irrationalité ». En réalité, l'une et l'autre sont assez équitablement réparties entre toutes les catégories de la société et l'acceptation de ce fait est évidemment un préalable à la qualité d'un débat. De plus, la rationalité n'est pas, et de loin, la seule pierre de touche de la pertinence de la décision.

En effet, la connaissance ne se limite pas à la compréhension des questions scientifiques et techniques : elle inclut la compréhension des considérations éthiques, de l'appréciation « personnelle » des risques, de la vision de l'avenir, de la responsabilité citoyenne. Le partage de cette connaissance, cadre et langage commun pour exprimer les opinions et les choix de chacun est indispensable au débat. Ce cadre permet de distinguer de façon relativement précise ce qui relève de la mesure, de l'expertise, de la formulation des alternatives et ce qui relève de la décision politique, au premier rang de laquelle se situe « l'acceptation du risque » qui ne relève pas de l'expert mais du citoyen. D'où la nécessité de reconnaissance d'une « expertise » en qui l'on puisse avoir confiance, seule façon de séparer, d'un commun accord, les faits et les opinions. Expertise qui peut se définir comme la combinaison de la *compétence*, de l'*honnêteté intellectuelle* et de la *liberté d'expression*. Les « experts » issus des organismes directement promoteurs du nucléaire ne peuvent pas revendiquer cette dernière qualité puisqu'ils sont, par profession, tenus de défendre les positions de leur entreprise ou de leur administration.

Par contre, il est essentiel qu'il existe des organismes publics dont l'expertise soit affirmée et encouragée par les pouvoirs publics : dans le cas du nucléaire, cet organisme doit être l'IRSN, dont l'*indépendance* vis-à-vis des entreprises et organismes promoteurs (dont le CEA) et de l'administration chargée du contrôle et le *devoir d'informer* doivent être en permanence réaffirmés et confortés.

Il n'en reste pas moins que la seule méthode qui permette d'assurer à la fois la qualité professionnelle de l'expertise et la confiance que l'on peut lui accorder est l'exercice permanent de l'*expertise plurielle et contradictoire*.

Cela signifie très pratiquement que d'autres organismes que les traditionnels promoteurs du nucléaire soient impliqués dans l'expertise nucléaire (CNRS, universités, bureaux d'études). Il y a eu des progrès (CNRS, CNE), encore

insuffisants (le nucléaire reste largement une « chasse gardée »). Il faut aussi que l'expertise « indépendante » et notamment l'expertise associative soit encouragée, c'est-à-dire très concrètement systématiquement sollicitée et rémunérée pour ses prestations.

L'usurpation de la fonction de décision par les organismes et les entreprises a été largement reconnue historiquement dans le domaine nucléaire. La facilité avec laquelle cela s'est produit ne vient pas seulement de leur pouvoir d'influence et de la consanguinité de leurs dirigeants avec ceux de la haute administration mais aussi du rôle que s'arroge, de façon beaucoup plus générale, « l'expert » ou présumé tel vis-à-vis du « politique », des citoyens et des médias.

L'expert a pris l'habitude de présenter à ses interlocuteurs une seule solution, présentée comme « l'optimum » et parée de toutes les vertus. *Volens, nolens*, les politiques ont laissé faire, souvent par paresse, parfois par intérêt.

Or il existe toujours des solutions alternatives : le devoir du politique est d'exiger des experts la présentation systématique d'alternatives, élaborées et discutées de façon plurielle et contradictoire. Le débat n'a de sens que si la construction et la présentation de ces alternatives est à la base de la discussion. Il est donc de la responsabilité de ceux qui demandent le débat comme de ceux qui l'organisent que les alternatives soient étudiées et présentées avec les mêmes moyens que la solution préconisée par le promoteur. Ce n'est que dans un système ouvert d'un éventail d'alternatives que la décision politique a un sens.

Comment décider ?

Le processus de décision doit tenir compte des spécificités de la question des déchets radioactifs qui est multidimensionnelle. Le débat rejoint certes le débat « classique » de la construction d'une installation à risque particulière dans le cadre d'une politique nationale (d'État ou d'entreprise) : où placer cette installation, quels critères de choix du site, quelle responsabilité locale dans la décision d'implantation, comment assurer la prise en charge locale, quel lien (solidarité, justice, compensation) entre le national et le local ?

Mais il s'en distingue par l'échelle des durées d'un entreposage ou d'un stockage de déchets nucléaires : comment assurer au niveau national le maintien d'un niveau suffisant de compétences sur longue période pour assurer la fonction de gestion des déchets nucléaires, comment assurer au niveau national les moyens financiers de cette gestion, comment assurer la surveillance et l'entretien locaux sur très longue durée, comment assurer même la « mémoire » du site, de ses fonctions et de ses risques ?

Vis-à-vis de telles exigences et en tenant compte de la « jeunesse » de la science nucléaire, du caractère incertain des évolutions futures (aussi bien pour ce qui concerne les systèmes énergétiques que les techniques d'utilisation de l'énergie nucléaire et celles du traitement et de la gestion des déchets ou tout simplement de la civilisation telle que nous la connaissons), la seule attitude responsable est l'application du principe de réversibilité :

- **Réversibilité dans les choix techniques** : possibilité de « reprendre » les déchets nucléaires en fonction des évolutions technologiques.
- **Réversibilité dans les décisions** : refus de s'engager dans une démarche linéaire d'enchaînement automatique de décisions « gigognes » soigneusement verrouillées.

La prise de décision dans ce domaine ne peut être qu'une « *décision en avenir incertain* ». Cela ne signifie aucunement qu'il ne faut rien faire mais qu'il faut refuser de définir une stratégie et de prendre des décisions en fonction d'un avenir présenté comme certain (comme cela a été trop souvent le cas, par exemple dans les décisions des programmes électronucléaires). Au contraire, la stratégie doit être adaptée à l'éventail des futurs possibles.

La prise de décision ne peut être effective que si elle associe, dans le débat et dans l'élaboration des alternatives, l'ensemble des acteurs concernés : entreprises et organismes promoteurs ; Gouvernement et Parlement ; administrations concernées ; organismes, entités et personnes « experts » ; associations environnementales et syndicats de travailleurs ; médias ; citoyens au niveau national et au niveau local ; collectivités territoriales concernées ou susceptibles de l'être.

Le débat public se doit d'être une « *opération pilote* » d'organisation de la discussion et de l'élaboration des éléments de la décision par la rencontre et la réunion de ces différentes catégories d'acteurs. C'est certainement un processus long et complexe mais il faut que les responsables politiques en comprennent l'importance et la nécessité. L'urgence est l'exercice de la démocratie et non l'enfouissement des déchets.

Autant que la présentation et la discussion des différents choix possibles et de l'expression des opinions des uns et des autres à leur sujet, le débat public a la responsabilité de proposer une « organisation du débat citoyen sur les déchets radioactifs » qui prendrait la suite du débat public et instaurerait, sur cette question extrêmement délicate, une démarche articulant démocratie participative et démocratie représentative.

L'aspect économique

Si la gestion des déchets nucléaires est un enjeu environnemental majeur, c'est aussi un véritable défi économique et financier. Le démantèlement des installations nucléaires et la gestion des déchets radioactifs sont en effet estimés à plus de 70 milliards d'euros.

Incertitude sur les coûts

Selon le rapport de la Cour des Comptes sur « Le démantèlement des installations nucléaires et la gestion des déchets radioactifs », de janvier 2005, à la fin de 2003, les provisions d'Areva, du CEA et d'EDF s'établissaient en valeur brute à 71,4 Md en valeur 2003 :

En M€ (millions d'euros)	Valeur actualisée	Valeur brute
AREVA	nd	12316
CEA	7 727	11 107
EDF	24 787	48 006
Total	nd	71 429

Ces sommes considérables doivent de plus être examinées avec prudence. Il n'est pas en effet impossible que le coût réel final soit encore plus élevé. Ce sont en effet des opérations lourdes tant les dimensions du problème sont nombreuses (environnementale, réglementaire, technologique...) et l'échelle de temps longue (plusieurs décennies, voire un siècle). De plus les expériences sont peu nombreuses, voire nulles pour les réacteurs de grande taille. Le coût du démantèlement fait donc l'objet d'estimations.

En France, les dépenses pour le démantèlement sont évaluées à 15 % du coût d'investissement initial des réacteurs par les instances officielles, soit 15 milliards d'euros (M€) pour l'ensemble du parc nucléaire actuel.

Les récentes expériences de démantèlement en France montrent que cette estimation devrait être revue à la hausse. C'est d'ailleurs ce qu'ont choisi de faire les Etats-Unis en 1991, en réévaluant ce pourcentage à 25 % du coût d'investissement. Un tel choix en France, augmenterait le besoin de fonds de 10 M€. Par exemple, si l'on applique cette règle à la centrale de Brennilis actuellement en démantèlement, le coût du démantèlement ainsi calculé ne serait que de 19,4 millions d'euros (M€) alors qu'aujourd'hui le coût annoncé est de plus de 480 M€. Toutes les expériences de démantèlement actuelles d'EDF sur les centrales de première génération confortent ce constat.

Ce constat est encore plus alarmant si l'on examine les incertitudes liées à la gestion des déchets nucléaires. Au chapitre des incertitudes, figure notamment le coût d'un éventuel stockage profond, base des estimations actuelles. Aujourd'hui, les industriels se fondent sur une évaluation de l'Andra qui chiffrait en 1996 le coût du stockage profond à plus de 14 M€. Depuis pourtant, l'Andra a effectué de nouvelles estimations basées sur différents scénarios inhérents à des options (comme le retraitement...) et donnait en 2003 une fourchette de coût allant jusqu'à 58 M€.

Ces énormes incertitudes engendrent bien sûr de fortes tensions, EDF refusant actuellement de tenir compte des dernières estimations de l'Andra afin de préserver la santé de ses comptes.

Des provisions sans garanties

Pour assurer le financement des charges futures, les industriels collectent et alimentent des fonds dédiés sous forme de provision. La gestion de ces fonds est primordiale pour assurer une disponibilité financière lorsque la gestion des déchets et le démantèlement devront être mis en œuvre.

Or, aujourd'hui, aucune surveillance ou garantie n'existe sur ces fonds. EDF et Areva ont même un accès direct à leurs fonds de provision. Les industriels placés dans un contexte concurrentiel ont donc la possibilité de les utiliser comme ressource pour leur développement. Ainsi, la récente politique d'expansion internationale très controversée d'EDF a eu des conséquences sur la disponibilité de ces fonds. Dans son rapport de janvier 2005, la Cour des Comptes note que « EDF, du fait de son endettement, ne dispose que d'un embryon d'actifs dédiés par rapport à la masse à financer (...) ». La gestion des fonds dédiés pose donc aussi d'importantes questions.

Responsabilité

Du fait de ces incertitudes et de cette mauvaise gestion, le risque d'un transfert des responsabilités financières des industriels sur l'État est grand : « *Les incertitudes nombreuses qui pèsent sur le financement futur de la gestion de ces déchets - volume réel, selon la stratégie de retraitement retenue, durée d'entreposage avant stockage, etc. - conduisent à poser la question de la capacité dans le temps des principaux producteurs de déchets à répondre à leurs obligations.* » note la Cour des Comptes.

Le transfert de responsabilité des industriels vers l'État est déjà une réalité au Royaume-Uni où le gouvernement a mis en place une autorité responsable de l'aval de la filière (Nuclear Decommissioning Authority) pour pallier la faillite des industriels.

Du côté français, à l'heure de la privatisation d'EDF et d'Areva, la volonté de se débarrasser de ces responsabilités nucléaires historiques et à venir est d'ailleurs parfois clairement affichée par certains responsables (Michel Maxant, deputy head of nuclear fuel for EDF dans Nuclear Fuel du 03 01 2004).

L'exemple de Marcoule

« *Le démantèlement de l'usine de retraitement de Marcoule représente l'opération de démantèlement la plus importante actuellement en cours en France et une des plus importantes au monde de par son ampleur financière de plus de 6 milliards d'euros (M€).* » rappelle la Cour des Comptes dans son rapport publié en janvier 2005. La dernière évaluation officielle date de novembre 1999 et s'établissait à 5,64 M€ en valeur 1996, soit 6,19 M€ valeur 2003.

La répartition de cette lourde charge financière a fait l'objet d'une véritable bataille entre le CEA, Cogema et EDF, les différents exploitants responsables. Cette crise a eu pour origine une mauvaise évaluation des coûts (due à la mauvaise connaissance des matières à gérer présentes sur le site), aggravée par l'attitude du ministère de la Défense qui a programmé la diminution de sa contribution alors qu'il est, à travers le CEA et ses applications militaires, l'un des principaux responsables des activités du site.

Un accord aurait finalement été trouvé en novembre 2004, mais aucune annonce officielle de la part des industriels ou des ministères de tutelle ne l'a publiquement confirmé. Seul un article dans la presse nationale a fait état publiquement de ce nouvel accord (Les Échos du 26 novembre 2004).

Cet accord prévoit que Cogema et EDF versent une soule libératoire au CEA qui deviendra alors l'unique responsable technique et financier du démantèlement et de l'assainissement du site de Marcoule. Le nouvel accord a de nombreuses conséquences économiques, sociales, juridiques et éthiques. La Cour des comptes souligne notamment et à juste titre que cet accord constitue de fait un transfert de responsabilité des industriels vers l'État : « (...) *une telle solution entraînerait le transfert des risques techniques et financiers, aujourd'hui répartis, sur un établissement public, c'est-à-dire indirectement l'État, puisque les ressources du CEA sont essentiellement constituées de subventions* ».

Il remet donc directement en cause le principe « pollueur-payeur ». La soule libératoire libère en effet totalement EDF et Cogema de leur responsabilité vis à vis de la gestion à long terme du site et des déchets, alors que de grandes incertitudes existent sur les coûts totaux du démantèlement du site et sur la destination finale des déchets.

Des propositions

La loi débattue en 2006 devrait impérativement prendre en compte la responsabilité financière des industriels sur la base du principe du « pollueur/payeur », du principe de précaution et du principe de transparence et de contrôle. Elles doivent en particulier s'appuyer sur :

- Une révision des estimations des coûts de démantèlement, cette révision devant en outre être faite de manière régulière à l'image de ce qui se fait dans d'autres pays ;
- La mise en place d'une gestion séparée des fonds de démantèlement, qui est la plus à même de « protéger » les provisions collectées ;
- Une refonte du dispositif de contrôle ; l'exigence de garanties supplémentaires aux exploitants pour couvrir le risque irréductible qui pèse sur la collecte et la disponibilité des provisions.

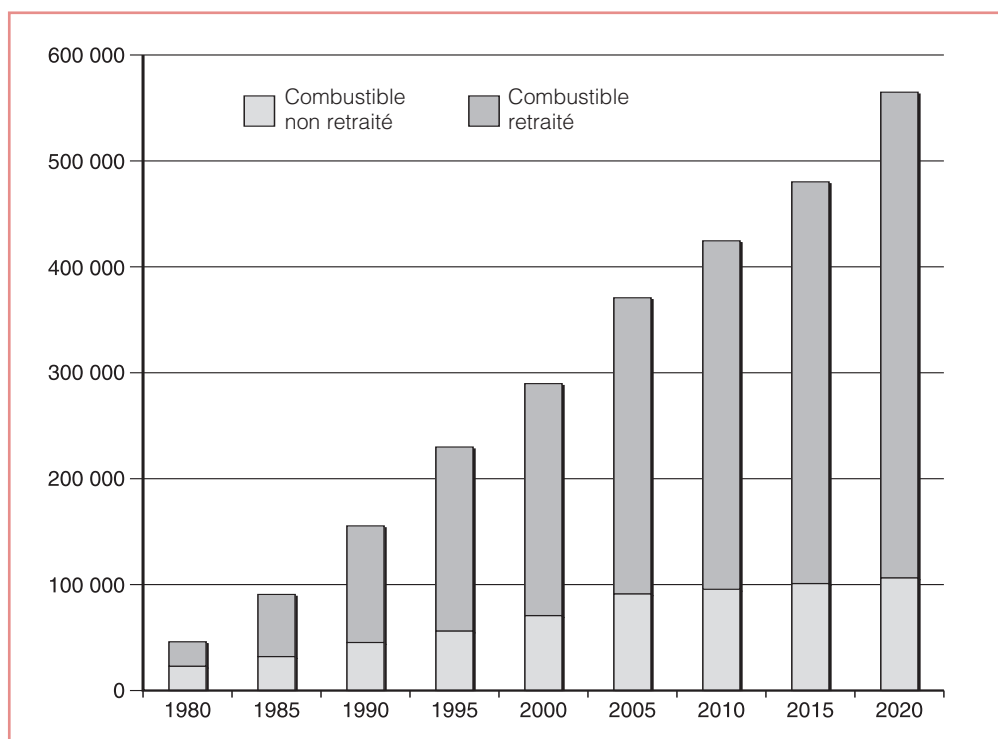
L'aspect international

Dans l'ensemble du monde il y a aujourd'hui 441 réacteurs actuellement opérationnels dédiés à la production d'électricité, principalement de la filière à eau, dont plus des trois quarts se situent aux États Unis, en Europe, au Japon et en Russie, utilisant principalement du combustible à Uranium (de l'ordre de 70 000 tonnes en 2005). Les Etats-Unis, la France et le Japon assurent à eux trois 58 % de la production mondiale d'électricité d'origine nucléaire.

Le retraitement reste marginal

Au contraire de la France, la plupart des pays du monde ne retraitent pas leur combustible usé. Cependant la Russie retraite ses combustibles et le Royaume-Uni l'a fait jusqu'en avril 2005, date à laquelle ses activités ont été interrompues suite à un incident grave dans son usine de Sellafield. L'usine de La Hague en France (comme Sellafield en Angleterre jusqu'à l'incident déjà cité) retraite aussi du combustible uranium pour le compte du Japon, de la Suisse, des Pays-Bas, de la Belgique et de l'Allemagne. L'Allemagne et la Belgique ayant décidé de « sortir du nucléaire » ont décidé récemment d'interrompre l'envoi de combustible usé à l'étranger pour retraitement. En revanche le Japon maintient sa volonté de retraiter le combustible usé et construit une usine de retraitement sur son sol dont la mise en route est annoncée pour 2006. L'Agence Internationale de l'Énergie Nucléaire (AIEA) a publié récemment une projection des masses combustibles usés mondiaux jusqu'en 2020 qui montre bien que la part du retraitement (de l'ordre d'un tiers en 2005) diminuera encore en 2020 comme le montre le graphique suivant.

Historique et projection de l'évolution de la part de combustible retraité au monde jusqu'en 2020 (en tonnes de combustible usé).



Le stock de combustible usé devrait donc continuer à augmenter rapidement au cours des quinze prochaines années.

Quelle solution dans les autres pays ?

Déchets de faible activité.

Dans certains pays comme l'Espagne ou la Suède la loi autorise la réutilisation de matériaux très faiblement radioactifs comme des gravats, après décontamination, pour les travaux publics ou l'industrie. Dans tous les autres pays ces déchets de faible activité sont stockés en surface et surveillés.

Déchets de moyenne activité à vie courte.

Dans la plupart des pays du monde, les déchets de moyenne activité et de courte période sont stockés en surface (Espagne, Japon) ou en profondeur (Suède, Finlande). Les pays qui n'ont pas choisi de site définitif les entreposent en attendant sur les lieux de production.

Déchets à vie longue.

Qu'ils soient de moyenne ou de haute activité, les déchets à vie longue sont enfermés dans des matrices de béton ou de verre et sont entreposés provisoirement. Les États Unis, la Suède, la Finlande et la Suisse ont déjà fait le choix de stocker ces déchets définitivement dans une couche géologique. Mais aucun site n'est encore opérationnel. Ces sites devraient accueillir en particulier tous les combustibles usés.

D'autres pays comme le Canada, le Royaume-Uni ou la France n'ont pas encore choisi parmi les solutions possibles.

D'autre part, l'AIEA, devant la rapide augmentation prévisible à moyen terme du stock mondial de combustible usé, étudie la possibilité de création de centres internationaux de stockage de déchets nucléaires, en arguant du fait qu'il serait plus facile d'assurer la sécurité de quelques grands sites plutôt que de nombreux sites disséminés. La Russie se déclare très intéressée par l'accueil d'un tel site. Mais de nombreuses voix s'élèvent pour s'opposer à un tel projet à la fois pour des raisons éthiques et pour des raisons politiques ainsi qu'à cause des risques liés au transport de ces matières dangereuses.

Mais, dans tous les cas, les producteurs de déchets hautement et moyennement radioactifs à vie longue se trouvent donc à court terme confrontés à la nécessité d'un entreposage d'attente des matériaux concernés – combustibles irradiés en l'état ou, pour ceux qui ont eu ou ont encore recours au retraitement, les produits qui en sont issus.

La dimension internationale

Bien que la pratique et le droit international consistent jusqu'ici à considérer chaque pays producteur responsable de la gestion des déchets, le problème de la gestion des déchets nucléaires à vie longue prend une dimension internationale croissante.

La « gestion sûre et écologiquement rationnelle des déchets radioactifs » a été inscrite comme l'un des chapitres de l'agenda adopté au Sommet de la Terre de Rio en 1992 (3). Même si le pays producteur en conserve la responsabilité, la gestion des déchets nucléaires à vie longue concerne potentiellement l'ensemble de la communauté internationale pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, l'accident de Tchernobyl a montré que les conséquences d'une importante dissémination de matières radioactives pouvaient être régionales. De plus, la nature de certaines matières concernées, susceptibles d'être le support d'un programme d'armement nucléaire, en fait une question de sécurité internationale. Enfin, une solution éventuelle de stockage définitif, qu'elle soit en surface, sub-surface ou profondeur, représente une emprise au sol qui affecte le droit de jouissance futur de ce sol des futures générations (par définition l'ensemble des descendants communs à l'humanité d'aujourd'hui).

Le problème se pose d'autant plus qu'un développement international du nucléaire est proposé par certains dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique. Justement, à l'image de ce qui se fait pour les gaz à effet de serre, la question pourrait alors se poser d'élaborer au niveau international un « Kyoto des déchets », c'est-à-dire un accord visant à définir des critères pertinents (voir fiche 07) et à fixer des limites quantifiables à l'accumulation de déchets liée à une poursuite de la production électronucléaire.

Sélection bibliographique

Andra, *Inventaire national des déchets radioactifs et des matières valorisables*, Rapport de synthèse, novembre 2004.

Andra, *Catalogue descriptif des familles de déchets radioactifs*, novembre 2004.

Andra, *Les recherches de l'Andra sur le stockage géologique des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue : résultats et perspectives*, juin 2005.

Bataille, Ch., Birraux, C., *Pour s'inscrire dans la durée : une loi en 2006 sur la gestion durable des déchets radioactifs*, Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST), mars 2005.

Bergeron, J., Schapira, JP, Simon, A, Thomas, JB, *la prospective technologique de la filière nucléaire*, mission d'évaluation économique de la filière nucléaire, rapport annexe du rapport Charpin Dessus Pellat, Commissariat au Plan, juin 2000.

Centre national de la recherche scientifique (CNRS), *Le CNRS et la gestion des déchets nucléaires*, juin 2005.

Charpin, JM, Dessus, B, Pellat, R, *Etude économique prospective de la filière électrique nucléaire*, Rapport au Premier ministre, la documentation française set 2000.

Commissariat à l'énergie atomique (CEA), *Les déchets radioactifs à haute activité et à vie longue - Axe 1 - Axe 3*, Version préliminaire du dossier 2005, juin 2005.

Commissariat à l'énergie atomique (CEA), « *La gestion des déchets radioactifs au terme de la loi* », Hors-série des Défis du CEA, juin 2005.

Commission européenne, *Eurobaromètre - Déchets radioactifs*, juin 2005.

Commission particulière du débat public sur la gestion des déchets radioactifs (CPDP), *Dossier soumis au débat*, septembre 2005 :

- **Ministères**, *Document des Ministères - Déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue : situer le contexte, les enjeux et les perspectives*, septembre 2005.
- **Industriels (EDF, Areva, CEA)**, *Les déchets radioactifs de la production d'électricité d'origine nucléaire*, septembre 2005.
- **Commissariat à l'énergie atomique (CEA)**, *La séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue*, septembre 2005.
- **Andra**, *Les recherches de l'Andra sur le stockage géologique des déchets radioactifs à vie longue*, septembre 2005.
- **Commissariat à l'énergie atomique (CEA)**, *Les procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée*, septembre 2005.
- **Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST)**, *Pour s'inscrire dans la durée : une loi en 2006 sur la gestion durable des déchets radioactifs (résumé)*, septembre 2005.
- **Commission nationale d'évaluation (CNE)**, *Résumé du rapport d'évaluation n° 11*, septembre 2005.
- **Dessus, B., Laponche, B., Marignac, Y.**, *Gestion des déchets nucléaires à vie longue - Analyse contradictoire*, septembre 2005.

Cour des Comptes, *Le démantèlement des installations nucléaires et la gestion des déchets radioactifs*, Rapport au Président de la République suivi des réponses des administrations et des organismes intéressés, janvier 2005.

Dautray, R, *Les isotopes du plutonium et leurs descendants dans le nucléaire civil*, Rapport à l'académie des sciences, mai 2005.

Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection (DGSNR), « *La gestion des déchets radioactifs en France* », Dossier de la revue Contrôle, n° 165, juillet 2005.

Girard Ph, Marignac, Y, *Le parc nucléaire actuel*, mission d'évaluation économique de la filière nucléaire, rapport annexe du rapport Charpin Dessus Pellat, Commissariat au Plan, mars 2000.

Makhijani, A. (Dir.), **IEER**, *Examen critique du programme de recherche de l'ANDRA pour déterminer l'aptitude du site de Bure au confinement géologique des déchets à haute activité et à vie longue*, Rapport commandité par le Comité local d'information et de suivi (CLIS), décembre 1994.

Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie (MINEFI), Ministère de l'écologie et du développement durable (MEDD), *Saisine de la Commission nationale du débat public (CNBP) sur les options générales en matière de gestion des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue*, mars 2005.

Commission nationale d'évaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (CNE), *Rapport d'évaluation n° 11*, juillet 2005.

Réseau Sortir du Nucléaire, *Déchets nucléaires, le casse-tête!* Brochure, juin 2005.

Numéros précédents

N° 1 - décembre 1992

Pourquoi Global Chance
L'effet de serre et la taxe sur le carbone
Les réactions à l'appel de Heidelberg

N° 2 - juin 1993

Global Chance et le nucléaire
Ecologie, environnement et médias
Science, progrès et développement

N° 3 - mars 1994

L'énergie en débat
Nucléaire civil et prolifération
Scénarios énergétiques et marges de liberté

N° 4 - juin 1994

Contributions au débat sur l'énergie
Agriculture, forêts et développement durable

N° 5 - avril 1995

Si l'on parlait climat?
Le débat national énergie & environnement
Les conditions d'une transition vers
un développement durable

N° 6 - février 1996

Numéro spécial en hommage à Martine Barrère

N° 7 - juillet 1996

Effet de serre : les experts ont-ils changé d'avis?
Rapports résumés du Groupe Intergouvernemental
sur l'Evolution du Climat
Commentaires et analyses

N° 8 - juillet 1997

Développement durable et solidarité

N° 9 - novembre 1997

De Rio à Kyoto
La négociation Climat

N° 10 - mars 1998

Le climat, risque majeur et enjeu politique
De la conférence de Kyoto à celle de Buenos
Aires. Coédité avec le Courrier de la Planète

N° 11 - avril 1999

Le nucléaire en débat - N'avons-nous pas le
temps d'élaborer des solutions acceptables

N° 12 - novembre 1999

Environnement et mondialisation

N° 13 - novembre 2000

Faire l'économie du nucléaire?
Un rapport récent relance le débat

N° 14 - mars 2001

Changements climatiques
Les politiques dans la tourmente
Coédité avec le Courrier de la Planète

N° 15 - février 2002

Les énergies renouvelables face au défi
du développement durable

N° 16 - novembre 2002

Maîtrise de l'énergie et développement durable

N° 17 - septembre 2003

Débat énergie
Une autre politique est possible

N° hors série - janvier 2003

Petit mémento énergétique
Eléments pour un débat sur l'énergie en France

N° 18 - janvier 2004

Le réacteur EPR : un projet inutile et dangereux

N° 19 - juin 2004

Climat, Energie : éviter la surchauffe

N° 20 - février 2005

Les utopies technologiques :
Alibi politique, infantilisation du citoyen ou
lendemains qui chantent?

Abonnement

Les cahiers de Global Chance

2 numéros par an

Nom : Organisme :

Adresse :

Code postal : Commune :

Abonnement individuel 25 euros

Abonnement d'institutions et organismes 80 euros

Ci-joint un chèque à l'ordre de l'Association Global Chance

A facturer

Total : euros Date : Signature :

Association Global Chance, 17 ter rue du Val - 92190 Meudon



Publication de l'association Global Chance
41, rue Rouget de Lisle - 92150 Suresnes
globalchance@wanadoo.fr

Global Chance est une association de scientifiques, qui s'est donnée pour objectif de tirer parti de la prise de conscience des menaces qui pèsent sur l'environnement global pour promouvoir les chances d'un développement mondial équilibré.

Ce petit mémento est consultable sur le site www.agora21.org, rubrique Bibliothèque, Éditions sur Agora 21