

P-16.17

WISE *Paris*

Service National d'Information sur l'Énergie
Verde Information Service on Energy

<http://www.wise-paris.org> • e-mail : secretariat@wise-paris.org

31-33 rue de la Colonie F-75013 PARIS • Tél. +33 1 45 65 47 93 • Fax +33 1 45 60 48 99

Recyclage des matières nucléaires

Mythes et réalités

**Calcul des taux de "recyclage"
du plutonium et de l'uranium
produits par la filière française
du retraitement des combustibles nucléaires**

Étude réalisée par
Xavier COEYTAUX, *Chargé d'étude à WISE-Paris*

Projet dirigé par
Mykle SCHNEIDER, *Directeur de WISE-Paris*

Commandé par Greenpeace France

Paris, Mai 2000
(Édition revue et corrigée du 5 Mai 2000)

a la suite
des p. 21

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	3
A. LE PLUTONIUM.....	4
1. Présentation	4
2. La séparation du plutonium.....	5
a) <i>Le combustible Uranium Naturel Graphite Gaz (UNGG)</i>	
b) <i>La filière à neutrons rapides</i>	
c) <i>Le combustible REP-UOX</i>	
d) <i>Le "Mixed Oxyde Fuel" (combustible REP-MOX)</i>	
e) <i>L'estimation des pertes de plutonium dans les rejets et les déchets</i>	
f) <i>Le bilan de la séparation du plutonium en France</i>	
3. Le "recyclage" du plutonium	8
a) <i>La filière à neutrons rapides</i>	
b) <i>Le combustible MOX</i>	
c) <i>Le cas du plutonium militaire</i>	
d) <i>Le bilan du "recyclage" du plutonium en France</i>	
4. La séparation et le taux de "recyclage" du plutonium	10
5. Le plutonium contenu dans le combustible irradié	11
B. L'URANIUM.....	12
1. Présentation	12
2. La séparation et le "recyclage" de l'uranium	12
a) <i>L'uranium de retraitement (URT)</i>	
b) <i>L'uranium de retraitement enrichi (URE)</i>	
c) <i>Le bilan du "recyclage" de l'uranium</i>	
3. Le combustible non retraité	13
4. Le cas de l'uranium appauvri.....	14
C. LE BILAN DU RETRAITEMENT-"RECYCLAGE".....	15
CONCLUSIONS	16
ANNEXES	18
ANNEXE 1 • <i>Le retraitement à La Hague, 1976-1998</i>	18
ANNEXE 2 • <i>Les rejets de plutonium dans l'environnement de La Hague, 1966-1998</i>	19
ANNEXE 3 • <i>Les expéditions de plutonium vers les usines de fabrication de MOX</i>	20
ANNEXE 4 • <i>Séparation de plutonium en France et son destin ultérieur</i>	21
ANNEXE 5 • <i>Stocks de plutonium en France</i>	22
ANNEXE 6 • <i>Flux de matières du cycle du combustible en 1998</i>	23

INTRODUCTION

L'objectif primaire de l'activité du retraitement nucléaire était la séparation du plutonium des combustibles irradiés sortant des réacteurs. Le plutonium était d'abord destiné, comme matière première, aux armes nucléaires, ensuite à la mise en route d'un programme de surgénérateur de type Superphénix. Hélas ! Les besoins militaires sont aujourd'hui satisfaits et Superphénix a été renvoyé dans les cendres.

Que faire donc du plutonium et de l'uranium sortant des usines de La Hague ? Les matières peuvent être " recyclées " dans les réacteurs à eau ordinaire, répondent la COGEMA et l'EDF. La France exploite 58 réacteurs de ce type, dont 20 sont autorisées à charger du combustible au plutonium dit MOX.

Au delà des considérations économiques, environnementales et stratégiques du choix du retraitement et donc de la filière au plutonium, il paraît intéressant d'analyser le taux réel de " recyclage " du plutonium et de l'uranium. C'est l'objectif principal de la présente étude.

Nous entendons par taux de " recyclage " la part du plutonium produit lors de l'irradiation du combustible nucléaire et de l'uranium " sous-enrichi " restant qui est d'abord séparée dans une usine de retraitement de type La Hague et ensuite effectivement réutilisée dans la fabrication d'un nouveau combustible nucléaire.

Nous avons donc calculé – en partie sur la base de chiffres publiés par la COGEMA, l'EDF ou le Ministère de l'Industrie, en partie sur la base de nos propres estimations (la différence étant soigneusement indiquée dans les références bibliographiques) – les quantités d'uranium et de plutonium qui ont été réutilisées dans l'exploitation des réacteurs nucléaires français.

Compte tenu de certaines incertitudes dans les données disponibles et de l'envergure très limitée des moyens du projet, il ne peut s'agir ici que d'une bonne estimation, effectuée pour la première fois, qu'il conviendra par la suite de compléter et de vérifier progressivement.

A. LE PLUTONIUM

1. Présentation

Le plutonium est l'un des éléments que l'on trouve en grande quantité dans le combustible nucléaire irradié. Sa radiotoxicité importante le place parmi les éléments les plus nocifs auxquels doit faire face l'industrie du retraitement. Il est produit lors du fonctionnement normal des centrales nucléaires et séparé lors du retraitement des déchets aujourd'hui à plus de 99 % (99,89 % selon COGEMA) et ne trouve d'utilisation que dans le combustible MOX ou dans les usages militaires. En France, le retraitement a été effectué seulement sur les sites de Marcoule et de La Hague.

Afin de fixer les ordres de grandeur des quantités de plutonium produites annuellement, on peut considérer la teneur en plutonium d'une tonne de combustible à oxydes d'uranium (UOX) préalablement enrichi à 3,5 % en isotope fissile de l'uranium, l'U-235 (soit au milieu de la fourchette 3,25-3,85 % aujourd'hui utilisée) déchargé d'un réacteur à eau pressurisée (REP) 900 mégawatts électriques (MWe) fonctionnant avec un rendement de 33%, un facteur de charge de 70% (moyenne nationale) et un taux d'irradiation moyen de 33 gigawatt jours par tonne (GWj/t) ¹ :

948,8 kg d'uranium,
9,7 kg de plutonium,
34,7 kg de radionucléides stables ou à vie courte,
2,3 kg de produits de fission et d'activation à vie longue,
0,7 kg d'actinides mineurs (neptunium, curium, américium).

On notera la différence substantielle de la teneur en plutonium du combustible déchargé en fonction de son taux d'enrichissement en uranium fissile. Ci-dessous sont présentées les caractéristiques d'un combustible enrichi à 3,25 % et exploité dans les mêmes conditions que ci-dessus ² :

955,7 kg d'uranium,
8,86 kg de plutonium,
0,78 kg d'actinides mineurs.

Afin de déterminer le taux de "recyclage" du plutonium, donc la part du plutonium qui a été réintroduite dans du nouveau combustible, nous allons tout d'abord fixer la quantité de matière, telle qu'on peut l'estimer au 31 décembre 1998, que contenait l'ensemble des combustibles retraités, c'est-à-dire de fixer des teneurs moyennes en plutonium des combustibles irradiés et déchargés des centrales nucléaires.

Les 11.450 t de combustibles uranium naturel graphite gaz (UNGG) qui ont été retraitées à Marcoule et à La Hague devaient contenir de l'ordre 0,2 % ^{3 4} de plutonium sur l'ensemble de la période (les taux de combustion étant compris entre 1 et 6 GWj/t), les 30,3 t de combustible de réacteurs à neutrons rapides de l'ordre de 20% de plutonium (les combustibles non irradiés avaient des teneurs de 30 % pour Rapsodie, 18 à 25 % pour Phénix et 15 à 19 %

¹ J-P Schapira, *Les déchets nucléaires*, éd. de physique, Paris, 1997.

² Annexes au rapport du groupe de travail sur la gestion des combustibles irradiés, Conseil supérieur de la sûreté nucléaire, 12.81-11.82.

³ RGN n°2, "Cycle du combustible", mars-avril 1996.

⁴ Rapport du groupe de travail sur la gestion des combustibles irradiés, Conseil Supérieur de la Sûreté Nucléaire, 12.81-11.82.

pour Superphénix ⁵), les 11,7 t de MOX retraitées environ 4 % et les 13.526 t de combustible UOX irradié, 0,93 % de plutonium jusqu'en 1990 et 0,97 % ensuite.

2. La séparation du plutonium

Le plutonium est extrait lors du processus de retraitement dans les usines de la COGEMA sur les sites de Marcoule et de La Hague. Le taux de séparation du plutonium des combustibles irradiés dans les usines de retraitement a évolué au fil des ans avec notamment l'amélioration des procédés de séparation. De fait, un taux de séparation de 98 % semble être la limite basse qu'il faut adopter (en prenant en compte les pertes liées au retraitement ; la CFDT ⁶ fait état de pertes de 2,7 à 3 % en 1980 et les contrats de retraitement avec les clients étrangers ⁷ permettent des pertes allant jusqu'à 3 %) lorsqu'on tente de moyenniser ce facteur sur une aussi longue période.

La complexité du problème vient du nombre de filières à prendre en considération, c'est-à-dire l'UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz), le RNR (Réacteurs à Neutrons Rapides), le REP classique (Réacteur à Eau Pressurisée) et le REP-MOX (Mixed Oxyde Fuel) qui ont connu chacune des développements différents et qui ont chacune leurs caractéristiques propres.

On se basera en particulier sur le tableau des quantités de combustible retraitées à La Hague afin de déterminer l'évolution des quantités de plutonium séparées dans les installations de la COGEMA (voir Annexe 1).

a) Le combustible Uranium Naturel Graphite Gaz (UNGG)

Le combustible uranium naturel graphite gaz (UNGG) a été retraité à UP1 à Marcoule et à UP2 à La Hague à différentes périodes et cette filière est aujourd'hui complètement abandonnée en France (le dernier réacteur de la filière, Bugey-1, fermait en mars 1994). Selon COGEMA, 10.801 t de combustible UNGG avaient été retraitées jusqu'à fin 1995, dont 5.906 t à UP1 et 4.895 t à UP2, sur ce total 1.655 t proviennent de la centrale espagnole de Vandellós. Au total, la filière UNGG aura donné lieu au retraitement en France de 11.450 t de combustible fin 1997 ⁸.

Connaissant la teneur en plutonium du combustible après irradiation à 4 GWj/t, qui est de 0,2 à 0,21 %, séparé à 98% jusqu'en 1989 puis à 99,88%, le tonnage traité donne un **total de 22,7 t de plutonium séparé** à partir du **combustible UNGG** ⁹. Le plutonium séparé à partir du combustible en provenance de la centrale de Vandellós n'a pas été restitué à l'Espagne.

b) La filière à neutrons rapides

La filière des réacteurs à neutrons rapides (RNR) est plus difficile à prendre en compte du fait du caractère expérimental des réacteurs (Rapsodie, Phénix, Superphénix) ayant fonctionné

⁵ Cycle du combustible des RNR en France - Situation/Perspective, colloque AIEA, 22-26 juillet 1985.

⁶ Le dossier électronucléaire, Syndicat CFDT de l'Énergie atomique, Éditions du Seuil, 1980.

⁷ "Contract between Cogema and SKBF", 12 juillet 1977.

⁸ Le retraitement des combustibles irradiés, CEA, Paris, 1982 ;
Cycle du combustible nucléaire : retraitement, CEA, Paris, mars 1989 ;
Retraitement recyclage, service des combustibles, EDF, Paris, 6 mars 1990 ;
Reprocessing - recycling : the industrial stakes, Bonn, 9 juillet 1995.

⁹ Selon le Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques sur l'aval du cycle nucléaire par MM. C. Bataille et R. Galley du 10 juin 1998, seulement 3,7 t de plutonium viendraient du retraitement de combustible UNGG. Ce chiffre correspond en fait au plutonium issu du retraitement des combustibles UNGG non utilisé à la fin de l'année 1997.

par intermittence, avec des combustibles à teneur en plutonium variable et à des taux de combustion différents.

Les ateliers et usines de retraitement atelier pilote de Marcoule (APM), l'atelier de traitement AT1 et l'usine de plutonium UP2 à La Hague affichent 30,3 t de combustible RNR retraité fin 1995¹⁰ qui pourrait avoir fourni de l'ordre de 5,9 t de plutonium (en prenant une teneur moyenne en plutonium de 20% et un taux de séparation de 98 %). Ce chiffre est cohérent avec les estimations de l'expert américain David Albright, président de l'Institute for Science and International Security (ISIS) qui évalue à 5,7 t le total du plutonium provenant de la filière RNR à la fin 1993¹¹. En effet, selon ses projections, en tenant compte des évolutions de cette filière depuis fin 1993 (Superphénix arrêté et Phénix fonctionnant en circuit fermé), le **combustible RNR** devrait avoir fourni environ **5,9 t de plutonium séparé**.¹²

c) Le combustible REP-UOX

Fin 1998, 13.526 t de combustible UOX en provenance de la filière des réacteurs à eau légère avaient été retraitées à La Hague (dont 5.797 t ou 42,8 % de combustible français, voir Annexe 1). Si l'on prend comme hypothèse un combustible frais enrichi de 3,25 % (dont 944 t pour la France jusqu'en 1989) à 3,7 % (dont 4.853 t pour la France depuis 1990) et un taux de séparation de 98 % jusqu'en 1989, puis de 99,88 % la filière du **combustible UOX** aura fourni 129,5 t de plutonium séparé au 31 décembre 1998, dont environ **55,6 t de plutonium français**.

d) Le "Mixed Oxyde fuel" (combustible REP-MOX)

Une infime fraction de MOX déchargé des réacteurs à eau légère a été retraité. Il semble, d'après le CEA, que le retraitement des combustibles à forte teneur en plutonium pose des problèmes de procédé dans des installations en place. La technique jusqu'alors utilisée consistait à mélanger les combustibles à forte teneur en plutonium avec des combustibles à faible teneur. L'EDF a fait comprendre qu'elle n'envisage pas le retraitement systématique du MOX. La qualité du plutonium de deuxième génération est nettement dégradée et son extraction se justifie encore moins que pour le plutonium de première génération.

Au 31 décembre 1998, **9,6 t de MOX** ont été retraitées (dont 4,7 t en 1992 en provenance d'Allemagne et 4,9 t en 1998 en provenance d'un programme expérimental des années 1970 dans le réacteur de Chooz-A, arrêté en 1991¹³) à **La Hague** et **2,1 t à l'atelier pilote de Marcoule** (en provenance d'Allemagne, avant 1991¹⁴), ce qui avec une teneur d'environ 4 % au déchargement pourrait avoir produit environ 0,5 t de plutonium, dont **0,2 t attribuée à la France**.

e) L'estimation des pertes de plutonium dans les rejets et les déchets

Il faut enfin prendre en compte le plutonium contenu dans les déchets solides produit par les usines de retraitement et les rejets sortant essentiellement de La Hague (les rejets des autres sites sont plusieurs ordres de grandeur en dessous du fait des faibles quantités retraitées, de la qualité différente des combustibles traités et d'une limitation plus stricte des rejets).

¹⁰ RGN, n°2, "Cycle du combustible", mars-avril 1996.

¹¹ "Plutonium and highly enriched uranium 1996, world inventories, capabilities and policies", D. Albright, F. Berkhout, W. Walker, SIPRI 1997.

¹² Les projections (dans leur version basse) de D. Albright concernant la production de plutonium en provenance du cycle du combustible partiellement fermé de Phénix donnent 0,1 t de Pu non réutilisé par an.

¹³ "Retraiter pour recycler", Cogema, février 1999.

¹⁴ RGN op. cit.

• Les pertes de plutonium dans les déchets

En ce qui concerne les déchets, les activités des colis entreposés au **Centre de Stockage de la Manche (CSM)**, les déchets dits de type A, dits de faible activité, nous donne un bon aperçu de la quantité de plutonium contenue dans ces derniers. L'inventaire 1998 de l'ANDRA¹⁵ ne donne malheureusement plus le détail des activités *par radionucléide*, mais en supposant que les proportions données dans l'inventaire 1996¹⁶ sont les mêmes, on trouve les activités suivantes : 239,5 TBq pour ²³⁸Pu, 97,2 TBq pour ²³⁹Pu, 39,5 TBq pour ²⁴⁰Pu. Ce qui correspond à 105,5 kg de ²³⁹Pu, 0,15 kg de ²³⁸Pu et 4,69 kg de ²⁴⁰Pu. La quantité de ²⁴¹Pu ne doit pas dépasser 3 kg compte tenu des teneurs isotopiques du plutonium généralement déchargé et de sa rapide dégradation en ²⁴¹Am. Le **CSM** devraient donc contenir de l'ordre de **113 kg de plutonium**.

Le **Centre de Stockage de l'Aube (CSA)** est l'autre grande installation française de stockage accueillant des déchets dits faiblement radioactifs (ou catégorie A). Afin d'évaluer la quantité de plutonium contenu dans les 213.640 colis stockés au 30 mars 1999 (le chiffre arrêté fin 1998 n'étant pas connu, nous obtiendrons ici une limite haute), nous utiliserons ici le chiffre de 34,4 TBq d'émetteurs alpha donné par l'ANDRA¹⁷. Dans l'hypothèse pénalisante où le plutonium est l'émetteur alpha prépondérant et en utilisant l'activité massique calculée plus bas pour ^{239/240}Pu de 3,49 TBq/kg, on obtient une **quantité maximum de plutonium** contenu dans les déchets stockés **au CSA de 9,9 kg**.

Cependant, en utilisant une répartition à 94 % de ²³⁹⁺²⁴⁰Pu et 6 % de ²⁴¹Pu, plus proche de la répartition isotopique de combustibles irradiés à 33 GWj/t, le contenu en **plutonium** des déchets stockés **au CSA passe à 150 g**. Dans l'attente de chiffres plus précis – des demandes de renseignement sont en cours auprès de l'EDF et de l'ANDRA – on peut toutefois noter que cette masse est négligeable dans le bilan total du plutonium contenu dans les déchets.

Les données quand aux déchets des **catégories dites B et C** restent générales, elles font état des volumes entreposés mais pas des activités par radionucléide qui sont essentielles pour calculer les quantités de plutonium contenu. En dehors de toutes données, on ne peut que faire une estimation imprécise de cette quantité, fondée sur l'évolution des pertes lors du retraitement. On prendra donc un facteur de perte de 2% (limite basse)^{18 19} jusqu'à 1989 et 0,12%²⁰ de 1990 à 1998. Pour la période précédant 1989, le retraitement de l'UNGG aurait provoquer la perte de 0,34 t de plutonium et l'UOX environ 0,52 t. Pour la période 1990-1998, les pertes liées au retraitement de l'UNGG sont négligeables (20 kg) et celles liées à l'UOX égales à 0,23 t.

Au total, c'est **environ 1 t de plutonium qui serait contenu dans les déchets du retraitement** dont environ 0,9 t de Pu dans les déchets de type B et C et 0,1 t dans les déchets dit de catégorie A.

• Les pertes de plutonium dans les rejets

La quantité de plutonium rejeté dans l'environnement peut être obtenue en considérant l'activité mesurée dans les effluents^{21 22} (voir Annexe 2).

¹⁵ Inventaire national des déchets radioactifs, Andra, 1999.

¹⁶ Inventaire national des déchets radioactifs, Andra, 1997.

¹⁷ Andra, 1999, op. cit. On notera que la répartition isotopique du plutonium contenu dans les colis de déchets n'est pas communiquée dans l'inventaire de l'ANDRA.

¹⁸ Le dossier électronucléaire, Syndicat CFDT de l'Énergie atomique, Éditions du Seuil, 1980.

¹⁹ Rapport du groupe de travail sur la gestion des combustibles irradiés, Conseil Supérieur de la Sécurité Nucléaire, 12.81-11.82.

²⁰ Cogema, 1999.

²¹ Impact des rejets radioactifs de l'établissement de La Hague, Cogema, 1998.

En considérant les activités massiques suivantes ²³ :

²³⁸Pu : 6,46e-1 TBq/g,

²³⁹Pu : 2,26e-3 TBq/g,

²⁴⁰Pu : 8,40e-3 TBq/g,

²⁴¹Pu : 3,70e+0 TBq/g,

²⁴²Pu : 1,41e-4 TBq/g,

^{239/240}Pu : 3,49e-3 TBq/g (calculé avec 80 % de ²³⁹Pu et 20 % de ²⁴⁰Pu sur le ^{239/240}Pu total),

on trouve 4,3 g de ²³⁸Pu, 963,2 g de ²³⁹Pu/ ²⁴⁰Pu, 57,3 g de ²⁴¹Pu et 16,4 g de ²⁴²Pu. On peut donc estimer au minimum à 1.041,2 g, soit **environ 1 kg**, la quantité de **plutonium rejetée dans l'environnement** avec les effluents de La Hague.

Au total, c'est **environ 1 t de plutonium** qui serait contenu dans l'ensemble des pertes dans les déchets et les rejets induits par le retraitement.

f) Le bilan de la séparation du plutonium en France

On peut donc estimer au 31.12.98 à 158,6 t le total du plutonium séparé en France, dont environ 84,4 t, soit 53 %, pour le compte de la France auquel vient s'ajouter environ 1 t contenu dans les déchets et les rejets dans l'environnement induits par le retraitement.

3. Le " recyclage " du plutonium

Les seules filières de réacteur nucléaire pouvant prétendre absorber du plutonium sont celles dont le combustible *frais* comporte une quantité donnée de plutonium. Donc seules les filières MOX et RNR sont à même de pouvoir consommer du plutonium.

a) La filière à neutrons rapides

Concernant les réacteurs à neutrons rapides RNR, les problèmes cités plus haut se posent dans les mêmes termes, à savoir l'estimation de la quantité de combustible consommée par cette branche, mais en plus la proportion dans laquelle ce combustible a été retraité (voir les problèmes de retraitement de ce type de combustible). De plus, il est très difficile de faire cette estimation pour Phénix qui a fonctionné en partie afin de produire du plutonium militaire.

En 1985, EDF affichait 15,8 t de plutonium consommé par la filière RNR²⁴. Selon l'estimation de David Albright²⁵, 17,5 t de plutonium avait été consommé par la filière RNR française au 31.12.93, dont 11 t pour Phénix, 5,9 t pour Superphénix²⁶ (on ne compte pas ici la deuxième recharge fabriquée mais jamais chargée à cœur), et 0,6 t consommée par d'autres réacteurs de recherche. Il faut cependant noter que le plutonium utilisé pour la fabrication du premier cœur de Superphénix n'est pas uniquement de provenance française. En effet, selon nos informations, de l'ordre de 4,8 t de plutonium ont été apportées par EDF, les 1,1 t restantes étant attribuables aux partenaires étrangers (l'ENEL italienne, 33% du capital, et la SBK germano-belgo-néerlandaise-anglaise, 16% du capital) impliquées dans le montage de la société NERSA, à la fois maître d'œuvre et exploitant à côté de l'EDF.

²² Inventaire des rejets radioactifs des installations nucléaires, Groupe radioécologie Nord-Cotentin, rapport final détaillé, juin 1999.

²³ Jean Lefevre, *Les déchets nucléaires*, CEA, 1986.

²⁴ "Cycle du combustible des RNR en France - Situation/Perspective", colloque AIEA, 22-26.07.85.

²⁵ "Plutonium and highly enriched uranium 1996, world inventories, capabilities and policies", D. Albright, F. Berkhout, W. Walker, SIPRI 1997.

²⁶ Communication personnelle, Christian Cartouze, porte-parole de l'installation nucléaire de Superphénix, Malville, 18.12.96.

En prenant en compte la mise à l'arrêt de Superphénix fin 1996 et l'exploitation de Phénix, on peut estimer à **18,1 t**, la quantité totale de **plutonium consommé par la filière RNR** au 31.12.1998, dont 17 t sont attribuables à la France.

b) Le combustible MOX

Utilisé depuis 1987 d'abord dans une seule puis dans quelques tranches, le MOX pour les réacteurs à eau pressurisée connaît depuis quelques années un développement fulgurant en France. Une partie du plutonium séparé à La Hague a été envoyé à l'étranger, soit pour la fabrication de MOX destiné à être re-importé en France, soit dans le but de restituer le plutonium aux clients étrangers de la COGEMA. (voir Annexe 3)

Pour l'instant, EDF poursuit sa politique de "moxage" de grande envergure. Ci-dessous l'évolution depuis 1994 du nombre de tranches moxées, du nombre d'assemblages chargés et l'estimation de la quantité de plutonium utilisée (assemblages de 460 kg pour une teneur de 4,5 à 5,3% jusqu'en 1997, puis de 6% à partir de 1998 jusqu'à 7,08% à partir de février 1999)²⁷ :

Tableau 1 : Le Programme MOX français et le plutonium absorbé

	1994	1995	1996	1997	1998
Nb de réacteurs contenant du MOX	7	7	9	13	17
Nb d'assemblages MOX chargés par an	88	56	72	176	228
Nb cumulé d'assemblages MOX chargés	424	480	552	728	956
Quantité cumulée de Pu (en t)	9,3	10,6	12,4	16,7	22,9

C'est donc un total d'environ **22,9 t de plutonium** qui étaient **absorbées dans le combustible MOX français** au 31 décembre 1998.

c) Le cas du plutonium militaire

Distinguer plutonium militaire et plutonium civil, jusqu'ici calculés ensemble, n'est pas un exercice aisé en ce qui concerne la France, du fait du lien très intime qu'ont entretenu ces deux filières par le passé, et à cause du sceau du secret qui pèse lourdement sur toutes les activités nucléaires militaires françaises. De fait, les chiffres sur les quantités de plutonium servant ou ayant servi à des fins militaires ne sont pas publiés et on utilisera par conséquent ici seulement des estimations.

La filière dite "civilitaire" (civile-militaire) débute dès 1958 avec la production de plutonium de qualité militaire (c'est à dire avec un contenu élevé en ²³⁹Pu fissile) dans les réacteurs graphite-gaz (utilisant du combustible UNGG) G1, G2 et G3 de Marcoule, et le traitement des combustibles irradiés dans l'usine UP1 (à Marcoule également). Cette production s'est poursuivie pendant les années 60 et 70 avec des réacteurs graphite-gaz à Chinon, à St Laurent et à Bugey et le démarrage dès 1966 de l'usine de retraitement UP2 à La Hague. Enfin, l'exploitation conjointe entre le CEA et EDF, de Phénix a également permis la production de plutonium à forte teneur en isotopes fissiles (dans ses couvertures dites fertiles). De plus, il est certain que l'exploitation d'autres réacteurs du CEA aient servi également à la filière militaire (tels que les réacteurs Célestins de Marcoule par exemple).

La filière graphite-gaz, de par les faibles taux de combustion qu'elle présente, a permis de produire un plutonium de "très bonne qualité militaire" (jusqu'à 99% de ²³⁹Pu) mais en faible

²⁷ Conférence SFEN, "10 ans de combustibles MOX en France", 17.06.97

proportion dans les combustibles irradiés (environ 0,1%). Cependant, la longue période d'exploitation de ce type de réacteurs permet d'estimer que 3,2 à 5,1 tonnes de plutonium pourraient avoir été produits par cette filière.²⁸ Le réacteur à neutrons rapides Phénix et les réacteurs à eau lourde Célestins²⁹, pourraient avoir permis la production de 1,1 à 2,7 tonnes de plutonium de qualité militaire avec un contenu en ²³⁹Pu proche de 97%.

La production total de plutonium destiné à la filière militaire pourrait donc varier de 4,3 à 7,8 tonnes. On prendra ici la valeur médiane de 6 tonnes de plutonium produites par la filière civile à des fins militaires.

On peut toutefois noter, qu'une fois déduites les pertes dues au procédé de retraitement (0,1 à 0,4 t) et aux tests d'armes nucléaires (0,6 à 1,1t), l'estimation au 31.12.1998 du stock de plutonium militaire (dont une partie est intégrée dans les armes et aucune partie n'est déclarée en excès) atteint 5 tonnes ³⁰.

Dans quelle mesure, la production/consommation de plutonium militaire peut avoir une influence sur le bilan du taux de " recyclage " du plutonium civil en France ? Les combustibles des réacteurs G1, G2, G3, Célestin-1 et Célestin-2 ainsi que les couvertures de Phénix ont été traités séparément et ne figurent pas dans l'évaluation de la production de plutonium dans la partie 1c. Par contre, la production de plutonium dans les réacteurs de la filière UNGG d'EDF (Chinon-A1, -A2, -A3, St-Laurent-des-Eaux-A1, -A2 et Bugey-1) est contenue dans l'évaluation. Il convient donc de tenir compte d'un " recyclage militaire " d'une partie de ce plutonium. David Albright estime la production de plutonium militaire des réacteurs UNGG d'EDF à 0,5 à 2 t ³¹.

Compte tenu de la grande incertitude liée à ce chiffre nous retenons le haut de la fourchette et calculons l'absorption **2 t de plutonium au titre du " recyclage militaire "**.

d) Le bilan du " recyclage " du plutonium en France

On peut donc estimer au 31.12.98 à 41,9 t le total du plutonium " recyclé " en France dans des combustibles pour les RNR, du combustible MOX et pour une faible part (2 tonnes) dans des applications militaires.

4. La séparation et le taux de " recyclage " du plutonium

Les considérations ci-dessus permettent de conclure sur le bilan entre le plutonium séparé et le plutonium " recyclé " en France :

Tableau 2 : Séparation et " recyclage " de plutonium français
(cumulé au 31 décembre 1998)

Source/destination du plutonium	Séparation (en t)	" Recyclage " (en t)
REP	55,6	
UNGG	22,7	
RNR	5,9	17,0
MOX	0,2	22,9
Militaire	?	2,0
Total	84,4	41,9

²⁸ D. Albright, F. Berkhout, W. Walker, "Plutonium and highly enriched uranium 1996, world inventories, capabilities and policies", SIPRI 1997.

²⁹ Dédiés initialement à la production de tritium pour les armes nucléaires, les deux réacteurs ont également fonctionné de 1980 à 1990 pour la production de plutonium militaire.

³⁰ David Albright, " Production and status of military plutonium stocks, end of 1998 ", ISIS Plutonium Workshop, Washington, March 2000.

³¹ Albright, Berkhout, Walker, op. cit.

Même en tenant compte de l'utilisation du plutonium en provenance des réacteurs électrogènes d'EDF à des fins militaires, on peut estimer au 31.12.1998, que le **taux de "recyclage" du plutonium séparé français est seulement de l'ordre de 49,6 %**.

Afin de déterminer le stock du plutonium, il convient de tenir compte, à côté du " recyclage " , des pertes dans les déchets et les rejets. Nous arrivons alors à un **stock de plutonium " civil " français** – plutonium non-irradié sous différentes formes physiques et chimiques (oxydes séparés, combustible frais, rebuts de fabrication MOX, etc.) – **de l'ordre de 41,5 t** à la fin de 1998.³²

5. Le plutonium contenu dans le combustible irradié

Contrairement à l'idée reçue, la France ne retraite pas la totalité des combustibles déchargés de ses réacteurs. Une partie importante du plutonium français est donc toujours contenue dans le combustible irradié entreposé sur les sites de réacteur et à La Hague.

Depuis quelques années, la France déclare à l'Agence International de l'Energie Atomique (AIEA) ses stocks de plutonium. Par définition, une partie de ce plutonium est sous forme d'oxyde, une partie sous forme de combustible neuf, une autre sous forme de combustible irradié, une quatrième sous la forme de rebuts de fabrication de combustible, etc.

Il est extrêmement difficile d'estimer la quantité de plutonium contenue dans les réacteurs et les piscines de refroidissement, du fait de la continuité des chargements et déchargements en combustibles divers. La Direction générale de l'énergie et des matières premières (DGEMP) au ministère de l'Industrie présente les résultats suivants sur le contenu en plutonium des combustibles irradiés à l'AIEA :

Tableau 3 : Plutonium contenu dans des combustibles irradiés en France

Quantités estimées de Pu contenu dans les combustibles usés des réacteurs à usage civil	au 31/12/94 en t	au 31/12/95 en t	au 31/12/96 en t	au 31/12/97 en t	au 31/12/98 en t
Pu contenu dans les combustibles déchargés et entreposés sur les sites des réacteurs à usage civil	60,0	63,6	64,9	66,7	74,9
Pu contenu dans les combustibles usés entreposés sur les sites des usines de retraitement	89,0	87,1	87,6	88,8	83,4
Pu contenu dans des combustibles usés détenu ailleurs	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5
Total 2	149,0	150,7	152,5	155,5	158,3

³² Il faut noter cependant que le plutonium étranger ayant été irradié dans le premier cœur de Superphénix est encore aujourd'hui sous responsabilité française (et semble devoir le rester). Si on comptabilise ce plutonium dans le combustible irradié comme français, les 1,1 t correspondantes ayant été " recyclé " diminuent le stock de plutonium au titre de la France à 40,4 t. Ce chiffre est à comparer avec le chiffre officiel de 40,3 t, déclaré par la France à l'Agence International de l'Energie Atomique. Toutefois, il faudrait alors comptabiliser les 1,1 t de plutonium étranger contenu dans le deuxième cœur (on se base ici sur la même hypothèse que pour le premier cœur) fabriqué mais qui lui n'a jamais été irradié. Ce plutonium étant lui aussi sous responsabilité française jusqu'à aujourd'hui, on en déduit que le stock réel de plutonium séparé " français " serait de 41,5 t.

Afin de distinguer la quantité de plutonium contenu dans les combustibles irradiés appartenant à la France, du total entreposé sur le site de La Hague, nous prenons ici les hypothèses suivantes : 6.700 t de combustible REP d'EDF entreposé au 31.12.98³³ dans les piscines de la COGEMA, dont 3.000 t pour la période allant jusqu'en 1989 puis 3.700 t pour la période 1990-1998. Ces deux derniers chiffres sont basés sur l'hypothèse que le parc nucléaire REP français a déchargé annuellement 1.000 t de combustible de 1990 à 1994 puis 1.100 t par la suite, et que parallèlement les installations de La Hague retraitaient 500 t de combustible EDF de 1990 à 1994 puis 800 t par an.³⁴

En reprenant les hypothèses énoncées plus haut sur les teneurs en plutonium des combustibles UOX (0,93 % jusqu'en 1989, puis 0,97 %), on peut estimer que les **combustibles français entreposés dans les piscines de La Hague contiennent de l'ordre de 63,8 t de plutonium.**

De fait, les combustibles étrangers entreposés sur le site de La Hague devraient contenir près de 19,6 t de plutonium.

Au total, les combustibles irradiés français entreposés soient dans les piscines des réacteurs à usage civil, soient sur le site de La Hague représentent un total proche de 138,7 t de plutonium.

En prenant en compte les **combustibles usés français entreposés non retraités**, soit 138,7 tonnes de plutonium, le **taux de "recyclage" du plutonium pour la filière nucléaire civile française tombe à 18,8 %.**

B. L'URANIUM

1. Présentation

Trois "types" d'uranium sont à prendre en compte afin d'évaluer le taux de réutilisation et les stocks :

- l'uranium **de retraitement** (URT), dit **sous-enrichi**, produit lors du retraitement des combustibles irradiés ;
- l'uranium **de retraitement enrichi** (URE).
- l'uranium **appauvri** provenant de l'enrichissement de l'uranium de retraitement.

2. La séparation et le " recyclage " de l'uranium

Afin de déterminer le taux de recyclage de l'uranium nous allons tout d'abord fixer la quantité de matière, telle qu'on peut l'estimer au 31.12.98, que contenaient l'ensemble des combustibles retraités. Les 11.450 t d'UNGG devaient contenir de l'ordre de 11.328,4 t d'uranium (soit une teneur de 99,2 %), et les 13.526 t de combustible UOX (y compris les combustibles étrangers) environ 12.852,2 t d'uranium (sur la base d'une teneur en uranium de 95,5 % jusqu'en 1989, puis 94,8 % de 1990 à 1998). Au total, c'est **environ 24.180,6 t d'uranium qui sont passées par les chaînes du retraitement.**

³³ Communication personnelle, Mr Debes, EDF, service du combustible, juillet 1999.

³⁴ Chiffres moyennés à partir des différents documents de la COGEMA sur cette période, contenant l'état d'avancement des contrats du retraitement.

a) L'uranium de retraitement (URT)

C'est l'uranium provenant des procédés de retraitement, c'est-à-dire après séparation du plutonium, des actinides mineurs et des produits de fission. Au 31 décembre 1998, 13.526 t de combustible UOX irradié ont été traitées à La Hague (dont 5.797 t pour la France), ce qui, avec les teneurs données plus haut, pourrait correspondre au maximum à 12.852,2 t d'uranium de retraitement. En intégrant le taux de séparation actuel donné par COGEMA (99,89%) et celui estimé plus haut pour la période couvrant le retraitement jusqu'en 1989 (98%), les combustibles UOX retraités aux usines de La Hague auraient produit environ 12.784,5 t d'uranium de retraitement (dont 5.479,1 t pour la France). À ce total, il faut ajouter les 11.450 t de combustible UNGG retraitées qui doivent avoir fourni environ 11.150,6 t d'uranium de retraitement, c'est à dire un **total approchant 23.935,1 t d'uranium de retraitement dont 16.629,7 t pour le compte de la France**³⁵.

b) L'uranium de retraitement enrichi (URE)

Connaissant la volonté affichée d'EDF³⁶ de produire 110 t d'uranium de retraitement enrichi (URE) pour 820 t d'uranium de retraitement (URT) après 2000, il semble important de s'intéresser à cette filière. Il s'avère que fin 1995, 230 assemblages d'uranium de retraitement enrichi (c'est à dire environ 105,8 t) avaient été produits à l'usine FBFC de Romans-sur-Isère et chargés en réacteur (dont 88 t en Belgique en 1990)³⁷. Le bilan complet est de 480 assemblages (250 assemblages de 1996 à 1998³⁸ dont 78 en 1998, voir Annexe 6 pour le flux de matières en 1998³⁹). On peut donc estimer que **221,3 t d'uranium de retraitement enrichi ont été assemblées et chargées en réacteur**. Cette quantité correspond au **sur-enrichissement d'environ 1.649,7 t d'uranium de retraitement**.

c) Le bilan du "recyclage" de l'uranium

Le **taux de "recyclage" de l'uranium** en provenance de **l'ensemble des combustibles** ayant été retraités en France (y compris les combustibles étrangers, soit) est donc de l'ordre de **7 %**.

Le **taux de "recyclage" de l'uranium** en provenance uniquement du retraitement des **combustibles irradiés français** est quant à lui **en dessous de 10 %**.

3. Le combustible non retraité

Le calcul suivant consiste à considérer l'ensemble du combustible déchargé des réacteurs français afin d'établir le taux de recyclage et non plus seulement la fraction destinée au retraitement.

Nous savons d'ores et déjà que :

1. 16.629,7 t d'uranium sont à mettre sur le compte de la filière du retraitement.
2. 6.700 t de combustibles irradiés sont entreposés à La Hague⁴⁰.
3. les combustibles entreposés sur les sites des réacteurs à usage civil correspondent à un contenu en plutonium de 74,9 t (voir tableau 3).

³⁵ Il convient de préciser que, pendant de nombreuses années, la COGEMA a repris à son compte l'uranium de retraitement de ses clients étrangers. Dans la mesure où ni les quantités ni les conditions de reprise ont été rendues publiques, nous excluons de nos calculs l'uranium retraité repris par la France.

³⁶ EDF, Délégation aux combustibles, Situation après l'an 2000, non-daté

³⁷ RGN n°2, "Cycle du combustible", mars-avril 1996

³⁸ Communication personnelle, Mr Debes, EDF, service du combustible, juillet 1999

³⁹ DSIN, Rapport d'activité 1998

⁴⁰ Communication personnelle, Mr Debes, op. cit.

En reprenant les hypothèses du paragraphe consacré au plutonium contenu dans les combustibles irradiés, sur les 6.700 t de combustibles UOX irradiés non retraités entreposés à La Hague, nous considérons 3.000 t comme appartenant à la période 1965-1989 et 3.700 t de 1990 à 1998. En reprenant les teneurs moyennes supposées pour ces deux périodes (soient 95,5 % puis 94,8 %), nous obtenons un contenu en uranium de 6.372,6 t.

En considérant les combustibles UOX et MOX irradiés entreposés comme appartenant tous à la période 1990-98 (soit avec des teneur en plutonium respectivement de 0,97 % et 4 %), les 74,9 t de plutonium correspondent à une quantité totale de combustible irradié de 7.035,1 t (dont 215 t de MOX⁴¹). De fait, ces mêmes combustibles devraient contenir de l'ordre de 6.727,5 t d'uranium.

Au total, nous sommes amenés à considérer **une quantité totale d'uranium français irradié** (et éventuellement retraité) de **29.729,8 t**.

Dans ce cas : **en considérant l'ensemble des combustibles déchargés par le parc nucléaire français, le taux de recyclage global de l'uranium est de l'ordre de 5,5 %.**

4. Le cas de l'uranium appauvri

Il faut 10.303,7 t d'uranium naturel pour fabriquer 1.200 t de combustible qui donneront lieu au retraitement de 850 t d'entre elles (le parc français et la pratique française actuelle)⁴², ce qui correspond à une production de 9.103,7 t d'uranium appauvri. En première approche (en considérant les 5.797 t de combustible UOX retraité, les 6.700 t entreposées à La Hague et les 7.721,6 t entreposées sur les sites de réacteurs) la filière des réacteurs à eau pressurisée français pourrait avoir produit 153.386,7 t d'uranium appauvri.

Afin d'affiner le calcul, on peut considérer la production d'uranium retraité sur-enrichi (710 t d'uranium appauvri pour 110 t d'uranium de retraitement enrichi⁴³) estimée plus haut. Cette filière pourrait avoir donné lieu à la production de 1.186,3 à 1.936,5 t d'uranium appauvri.

Il faut savoir enfin, que la production de MOX "consomme" de l'uranium appauvri dans la proportion 125 t d'U appauvri pour 135 t de MOX⁴⁴ ; selon l'estimation de 490,4 t de MOX produit (764 assemblages chargés fin 1997 et 139 t produites en 1998⁴⁵), environ 454,1 t d'uranium appauvri ont pu être utilisées.

Ces chiffres nous amènent à un **stock total de l'ordre de 154.500 t d'uranium appauvri** contre les 98.346 t recensées par la DSIN⁴⁶. Il faut rappeler que ces chiffres sont des stocks civils qui n'incluent pas l'uranium appauvri provenant du domaine militaire ayant enrichi de l'uranium à plus de 90%, et qui augmente significativement le stock total d'uranium appauvri.⁴⁷

⁴¹ On prend ici une base de 215 t de MOX entreposé fin 1998, calculée à partir de la projection de la situation en 2000 du "Rapport d'Évaluation n°5" de la Commission Nationale d'Évaluation (juin 1999), à savoir 415 t de MOX entreposé en 2000 et 100 t de MOX déchargées annuellement.

⁴² EDF, Délégation aux combustibles, Situation après l'an 2000, non-daté.

⁴³ EDF, op. cit.

⁴⁴ EDF, op. cit.

⁴⁵ Rapport d'activité 1998, COGEMA.

⁴⁶ Rapport d'activité 1998, DSIN.

⁴⁷ Le doublement voire le triplement du stock total d'uranium appauvri qu'envisage David Albright ("*Plutonium and highly enriched uranium 1996, world inventories, capabilities and policies*", SIPRI 1997) semble exclu : à partir de son chiffre de 24 t d'uranium hautement enrichi produit à des fins militaires, le calcul montre que le stock total d'uranium appauvri pourrait se voir augmenté de l'ordre de 5.000 t uniquement.

C. LE BILAN DU RETRAITEMENT-“ RECYCLAGE ”

Si l'on ne considère que **les combustibles français retraités**, soient 17.247 t (tous combustibles confondus), **le taux de recyclage des matières nucléaires avoisine 9,8 %**.

Enfin, sur la base des 30.322,4 t de combustibles UOX et UNGG français déchargés au 31 décembre 1998, **le taux de recyclage global des matières nucléaires mises en jeu par le retraitement en France passe à 5,6%**.

CONCLUSIONS

Le programme nucléaire français a réellement démarré avec la mise en service du réacteur G1 à Marcoule en 1956. S'il a été couplé au réseau d'EDF, sa vocation principale était la production de plutonium pour les besoins du programme d'armement nucléaire français. Le plutonium a été séparé dans l'usine dite de retraitement UP1 (UP = usine de plutonium) à Marcoule avant de servir de matière première pour des têtes nucléaires.

Dans les 20 ans qui suivirent, le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) a développé une industrie nucléaire puissante, dont l'un des objectifs restait la production de plutonium, non-seulement pour les bombes mais aussi pour une nouvelle génération de réacteurs, les surgénérateurs de type Superphénix. Ces réacteurs dits à neutrons rapides devaient produire dans le courant de leur exploitation même plus de plutonium qu'ils n'en consomment. Le plutonium était considéré comme ressource énergétique inépuisable.

Aujourd'hui, tout a changé. Superphénix a été arrêté définitivement, faute d'intérêt économique et suite à de nombreux problèmes techniques. EDF attribue à ses stocks de plutonium une valeur zéro dans sa comptabilité et le prix de l'uranium naturel tombe depuis une vingtaine d'années de façon spectaculaire plutôt que de grimper.

Curieusement le "retraitement" à La Hague a continué, comme si rien n'avait changé. La présente étude ne porte aucun regard sur les implications économiques, environnementales ou stratégiques de la politique nucléaire française. Ce rapport fait simplement le bilan de la gestion des combustibles irradiés, de la production du plutonium et de l'utilisation de l'uranium et du plutonium séparé lors du traitement des combustibles irradiés.

Quid du dogme du "recyclage" du plutonium et de l'uranium ?

Quelques données chiffrées (chiffres arrondis, au 31.12.98)

1. La production et la séparation du plutonium

1. Au total, environ **30.000 tonnes de combustibles irradiés ont été déchargées** des réacteurs nucléaires en France.
2. Au total, environ **17.000 tonnes de combustibles irradiés** attribués à la France ont été **retraités** à Marcoule et à La Hague.
3. Au total, plus de **84 tonnes de plutonium** (38 % du total contenu dans les combustibles irradiés déchargés) ont été **extraites** à Marcoule et à La Hague au titre de la France.
4. Au total, les **combustibles irradiés français toujours entreposés**, soit dans les piscines des réacteurs à usage civil soit sur le site de La Hague, représentent un total proche de **140 tonnes de plutonium** (62 % du total contenu dans les combustibles irradiés déchargés).
5. Au total, environ **1 tonne de plutonium** est contenue **dans les déchets**.
6. Au total, **1 kg de plutonium a été rejeté dans l'environnement**⁴⁸ de La Hague lors du retraitement.

⁴⁸ Rappelons que quelques millièmes de grammes de plutonium inhalé suffisent pour induire un cancer du poumon.

II. Le “ recyclage ” du plutonium

1. Environ **17 tonnes de plutonium** ont été irradiées dans le cadre du programme **surgénérateur** pour le compte de la France.
2. Environ **23 tonnes de plutonium** ont été irradiées sous forme de combustible **MOX** dans les réacteurs nucléaires classiques.
3. Environ **2 tonnes de plutonium** en provenance de réacteurs d'EDF ont été “ recyclées ” dans le cadre du programme d'**armement nucléaire** français.

III. La séparation et le “ recyclage ” de l'uranium

1. Au total, environ **16.600 tonnes d'uranium** ont été **séparées lors du retraitement de combustibles irradiés français**.
2. Au total, environ **1.600 tonnes d'uranium de retraitement** ont été ré-enrichies et réutilisées.

Les taux de “ recyclage ” du plutonium et de l'uranium

Le taux de “ recyclage ” :

- du total du **plutonium séparé** du combustible irradié (< 1 % de la matière nucléaire contenue) attribué à la France reste **en dessous de 50 %** (< 42 t sur 84 t) ;
- du total du **plutonium produit** dans les réacteurs français est de **moins de 20 %** (42 t sur 224 t) ;
- du total de **l'uranium séparé** de combustible irradié attribué à la France reste **de l'ordre de 10 %** (1.600 t sur 16.000 t) ;
- du total de **l'uranium contenu** dans le combustible irradié français dépasse à peine les **5 %**.

Le stock de plutonium français, plus de 40 tonnes à la fin de 1998 ⁴⁹, dépasse la production totale depuis sa mise en service en 1994 de l'usine de retraitement UP2-800 à La Hague, soit 33 tonnes environ à la fin de 1998. En d'autres termes : on a mis en service, à prix d'or, une usine pour la fabrication d'un produit que l'on a mis sur les étagères.

Le recyclage des matières nucléaires contenues dans les combustibles usés en France est bien un mythe.

⁴⁹ Il convient d'ajouter à ces quantités quelques 35 tonnes de plutonium d'origine étrangère actuellement entreposées en France.

ANNEXE 1

Le retraitement à La Hague 1976 à 1998 ⁵⁰
Combustibles UOX, MOX et RNR (en tonnes)

Année	UOX à UP2	UOX à UP3	Total UOX	MOX	RNR
1976	14,6		14,6		
1977	17,9		17,9		
1978	38,3		38,3		
1979	79,3		79,3		2,2
1980	104,9		104,9		1,5
1981	101,3		101,3		2,2
1982	153,5		153,5		
1983	221,0		221,0		2,0
1984	255,1		255,1		2,1
1985	351,4		351,4		
1986	332,6		332,6		
1987	424,9		424,9		
1988	345,7		345,7		
1989	430,3	30,0	460,3		
1990	331,0	195,0	526,0		
1991	311,1	351,4	662,5		
1992	219,9	448,0	667,9	4,7	
1993	354,0	600,0	954,0	0,0	
1994	575,9	700,4	1276,3	0,0	
1995	758,1	800,6	1558,7	0,0	
1996	862,0	818,9	1680,9	0,0	
1997	849,6	820,3	1669,9	0,0	
1998	807,0	822,0	1629,0	4,9	
Total	7939,4	5586,6	13526,0	9,6	10,0

⁵⁰ " Reprocess to recycle ", Cogema, 16.06.1999

ANNEXE 2

Les rejets de plutonium dans l'environnement de La Hague 1966-98 ⁵¹

	236Pu	238Pu	239/240Pu (*)	241Pu	242Pu
1966		2,11E-05	1,60E-03	3,27E-03	
1967		2,52E-04	1,19E-02	4,94E-02	
1968		1,24E-03	3,15E-02	2,96E-01	
1969		4,32E-04	1,34E-02	9,92E-02	
1970		8,57E-04	2,38E-02	2,01E-01	
1971		1,31E-02	1,45E-01	3,06E+00	
1972		5,56E-03	6,63E-02	1,32E+00	
1973		7,74E-03	8,12E-02	1,79E+00	
1974		5,10E-02	5,52E-01	1,19E+01	
1975		3,40E-02	2,62E-01	7,30E+00	
1976	3,42E-06	4,18E-02	1,57E-01	6,52E+00	2,75E-05
1977	1,14E-05	1,40E-01	2,39E-01	1,16E+01	9,58E-05
1978	1,63E-05	1,78E-01	2,16E-01	1,36E+01	1,30E-04
1979	1,50E-05	1,99E-01	2,45E-01	1,85E+01	1,75E-04
1980	1,21E-05	1,79E-01	1,86E-01	1,53E+01	1,65E-04
1981	1,58E-05	2,13E-01	1,64E-01	1,45E+01	1,65E-04
1982	1,36E-05	2,14E-01	1,94E-01	1,74E+01	1,98E-04
1983	8,63E-06	1,26E-01	8,10E-02	8,74E+00	1,06E-04
1984	1,15E-05	1,83E-01	1,36E-01	1,39E+01	1,81E-04
1985	2,27E-05	3,15E-01	1,36E-01	1,69E+01	2,67E-04
1986	7,50E-06	1,36E-01	8,12E-02	9,10E+00	1,35E-04
1987	1,56E-05	1,70E-01	8,59E-02	1,04E+01	1,58E-04
1988	6,35E-06	1,07E-01	6,34E-02	7,52E+00	1,13E-04
1989	7,53E-06	1,23E-01	5,59E-02	6,94E+00	1,19E-04
1990	5,09E-06	1,14E-01	5,33E-02	6,20E+00	1,08E-04
1991	2,34E-06	6,63E-02	2,33E-02	2,70E+00	5,24E-05
1992	1,34E-06	3,47E-02	1,52E-02	1,73E+00	3,08E-05
1993	8,29E-07	2,31E-02	1,15E-02	1,27E+00	2,26E-05
1994	7,97E-07	2,62E-02	9,80E-03	1,10E+00	2,23E-05
1995	3,81E-07	1,60E-02	5,69E-03	6,11E-01	1,30E-05
1996	2,80E-07	1,14E-02	4,61E-03	4,89E-01	1,02E-05
1997 (**)	2,78E-07	1,13E-02	4,58E-03	4,86E-01	1,01E-05
1998 (**)	2,71E-07	1,10E-02	4,47E-03	4,74E-01	9,90E-06
Total	1,79E-04	2,75E+00	3,36E+00	2,12E+02	2,31E-03
Activité massique (TBq/g)	1,97E+01	6,46E-01	3,49E-03	3,70E+00	1,41E-04
Masse (en g)	9,09E-06	4,3	963,2	57,3	16,4
Composition isotopique	0,0%	0,4%	92,5%	5,5%	1,6%

* Les appareils de mesures utilisés actuellement ne pouvant discerner les activités propres à chacun de ces radionucléides, on mesure donc une activité globale ^{239/240}Pu

⁵¹ "Inventaire des rejets radioactifs des installations nucléaires", Groupe radioécologique Nord-Cotentin, rapport final détaillé, juin 1999

(*) : activités mesurées par Cogema

(**) : activités supposées dans le respect des ordres de grandeur

En italique les activités recalculées en remplacement des mesures

ANNEXE 3

Les expéditions de plutonium vers les usines de fabrication de MOX

Afin d'évaluer le taux de "recyclage" global du plutonium séparé sur le sol français, il faut prendre en compte les expéditions de plutonium séparé vers les usines de fabrication de combustible.⁵² Il est toutefois important à souligner que, jusqu'à présent, seulement une partie du plutonium expédié vers les pays étrangers a été utilisé pour la fabrication de nouveau combustible. Une estimation crédible du taux de recyclage international dépasserait le cadre de la présente étude.

Expéditions de plutonium vers les usines de fabrication de combustible MOX (en tonnes)

Année	Melox	Cadarache	Dessel (*)	Étranger hors BN (*)	Total
1976				0,1	0,1
1977				0	0
1978				0,3	0,3
1979				0	0
1980		0,4		0,3	0,7
1981		0,3		0,3	0,6
1982		0,2		0,5	0,7
1983		0,2		0,7	0,9
1984		0,1		1	1,1
1985		0,4		1,6	2
1986		0,4	0,2	0,6	1,2
1987		0,3	0,9	0,5	1,7
1988		0,6	0,9	0,8	2,3
1989			1,2	0,7	1,9
1990		0,5	2	1,2	3,7
1991			1,1	0,7	1,8
1992		0,7	0,8	2,4	3,9
1993		0,9	1,4	0,3	2,6
1994	0,4	0,8	0,4	1,6	3,2
1995	2	2,1	0,2	1,7	6
1996	3,5	0,2	1,7	3,2	8,6
1997	5,7	0	1,9	3,6	11,2
1998	6,6	2,4	1,9	3,8	14,7
Total	18,2	10,5	14,6	25,9	69,2

(*) : usine de production de MOX de Belgonucléaire (BN) à Mol.

Dans le bilan des (ré)expéditions de plutonium, il est intéressant à regarder les quantités de plutonium ayant quitté le territoire français (colonnes "Dessel" et "Étranger"). Une petite part de ce plutonium est revenu sous forme de MOX en France. Au total, environ 40,5 t de plutonium ont été expédiées à l'étranger au 31.12.98, alors que 28,7 t de plutonium ont été fabriquées en MOX dans les deux usines françaises à Cadarache et à Marcoule (dont une partie pour des clients étrangers).

⁵² Rapport de l'office parlementaire sur l'aval du cycle nucléaire par MM. C. Bataille et R. Galley du 10.06.98

En italique les chiffres estimés à partir de la production de MOX de Belgonucléaire, de Melox et de Cadarache.

ANNEXE 4

Séparation de plutonium en France et son destin ultérieur

On peut maintenant estimer le stock de plutonium sur le sol français à la fin 1998 et regarder son évolution depuis 1994, date à laquelle la DGEMP (Direction générale de l'énergie et des matières premières au ministère de l'Industrie) faisait ses premières déclarations à l'AIEA (Agence International de l'Energie Atomique) à propos des quantités de plutonium entreposées sur le territoire national.

Plutonium séparé et absorbé cumulé (en tonnes)

en t de plutonium	1994	1995	1996	1997	1998
UNGG (jusqu'en 89)	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3
UNGG (depuis 90)	4,0	4,8	5,2	5,5	5,5
UOX (jusqu'en 89)	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5
UOX (depuis 90)	39,6	54,7	71,0	87,2	102,9
RNR (jusqu'en 89)	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
RNR (depuis 90)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
MOX (depuis 90)*	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
utilisation RNR**	-18,1	-18,1	-18,1	-18,1	-18,1
utilisation MOX***	-10,1	-11,8	-13,5	-17,5	-24,1
expéditions étr. (hors BN)	-13,6	-15,3	-18,5	-22,1	-25,9
Belgonucléaire (BN)	-8,9	-9,1	-10,8	-12,7	-14,6
TOTAL STOCKS DE Pu EN F	42,9	55,2	65,3	72,3	75,9
Bilan DGEMP Stocks de Pu	42,9	55,3	65,4	72,3	75,9
Différence WISE-Paris/DGEMP	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0

(*) : 0,2 t du total attribuable à la France

(**) : 1,1 t du total est attribuable à du plutonium d'origine étrangère sous responsabilité française (voir chapitre 1c)

(***) : dont 1,2 t pour du MOX allemand et belge

Si l'on se base sur les déclarations de la DGEMP⁵³, on peut donc penser que les facteurs de séparation de 98% pour la période allant jusqu'en 1989 puis 99,88% pour la période 1990-1998 et les teneurs en plutonium correspondantes sont réalistes⁵⁴.

Le "recyclage" est loin d'absorber la totalité du plutonium séparé : moins de la moitié du plutonium français ont été réutilisés.

Globalement, à peine plus d'un quart du plutonium sorti des usines de retraitement en France a été réintroduit en réacteur en France ou ailleurs ou, au moins, réexpédié dans le pays d'origine.

⁵³ Rapport de l'office parlementaire sur l'aval du cycle nucléaire par MM. C. Bataille et R. Galley du 10.06.98

⁵⁴ INFCIRC/549/Add.5a du 06.04.1998, INFCIRC/549/Add.5/1 du 11.11.1998 et INFCIRC/549/Add.5/2 du 03.11.1999, <http://www.iaea.org/worldatom/infcircs>

ANNEXE 5

Stocks de plutonium en France

Voici dans le détail ce que la France a déclarée à l'Agence International de l'Energie Atomique (AIEA) à propos de ses stocks de plutonium :

Déclarations officielles des stocks de plutonium détenus en France^{55/56/57}

Statistiques annuelles pour les stocks de Pu civil non irradié et séparé	au 31/12/94 en t	au 31/12/95 en t	au 31/12/96 en t	au 31/12/97 en t	au 31/12/98 en t
Pu séparé et non irradié stocké dans les usines de retraitement	27,8	36,1	43,6	48,4	52,0
Pu séparé et non irradié en cours de fabrication et Pu contenu dans des produits semi-finis non irradiés localisés dans les usines de fabrication de combustible ou autres	8,7	10,1	11,3	12,2	11,8
Pu contenu dans des combustibles MOX non irradiés ou d'autres produits finis, dans les centrales ou ailleurs	1,8	3,6	5,0	6,3	6,8
Pu séparé et non irradié détenu ailleurs	4,6	5,5	5,5	5,4	5,3
Total 1	42,9	55,3	65,4	72,3	75,9
Pu étranger sur total 1	21,6	25,7	30,0	33,6	35,6
Pu détenu à l'étranger non compté dans total 1	0,6	0,2	0,2	0,0	< 50 kg

⁵⁵ L'énergie nucléaire en 113 questions, Ministère de l'Industrie, mars 1996.

⁵⁶ Communiqué du Ministère de l'Industrie du 5 septembre 1997.

⁵⁷ INFCIRC/549/Add.5a du 6 avril 1998, INFCIRC/549/Add.5/1 du 11 novembre 1998 et INFCIRC/549/Add.5/2 du 3 novembre 1999, <http://www.iaea.org/worldatom/infcircs>

ANNEXE 6

Flux de matières du cycle du combustible en 1998 ⁵⁸ :

Installation	Produit traité	Produit élaboré
Comurhex (Pierrelatte)	Nitrate d'uranyle (uranium de retraitement)	UF4 : 275,5 t UF6 : 272 t
COGEMA (Pierrelatte)	Nitrate d'uranyle (uranium de retraitement) UF6 (uranium appauvri) Total parc entreposé	U3O8 : 1.096 t - U3O8 : 13.509 t U3O8 : 84.000 t
Eurodif (Pierrelatte)	UF6 (uranium naturel) : 16.268 t	UF6 (uranium appauvri) : 14.346 t UF6 (uranium enrichi) : 1.922 t
FBFC (Pierrelatte)	UF6 (uranium enrichi) : 243 t	UO2 (éléments combustibles) : 194 t
FBFC Romans	UF6 (uranium enrichi) : 1.041 t UF6 (uranium de retraitement enrichi) : 102 t	UO2 (éléments combustibles) : 790 t UO2 (URE - éléments combustibles) : 78 t
ATPu Cadarache	UO2 (uranium appauvri) : 41,2 t (?) PuO2 : 2,4 t	MOX (crayons combustibles) : 41,2 t (?) Combustible pour Phénix : 0,7 t
MELOX Marcoule	UO2 (uranium appauvri) : 120 t PuO2 : 6,6 t	MOX (éléments combustibles) : 114,4 t
COGEMA La Hague	Éléments combustibles irradiés Tonnage traité : UP3 : 822 t UP2 800 : 779 t UP2 400 : 32 t Éléments combustibles irradiés déchargés en piscine : 937 t	Colis de déchets vitrifiés produits : UP3 : 519 conteneurs UP2 800 : 463 conteneurs PuO2 : 14 t Nitrate d'uranyle : 1.630 t

⁵⁸ Rapport d'activité 1998, DSIN.