



SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

Éditeur R. Turlay

# LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

**un dossier  
scientifique**

les éditions  
  
de physique

## Errata - Les déchets nucléaires

Turlay Éd. (Les Éditions de Physique, Les Ulis, 1997)

### Chapitre 1. Le dossier des déchets nucléaires

de Jean-Paul Schapira

#### Page 13. Figure 2.

L'encadré sur les déchets C (en bas, à droite) doit être lu comme suit :

Déchets C	
Comb. irradié	21,5 t
Uranium	20,4 t
Plutonium	209 kg
Np, Am, Cm	16 kg
PF total	745 kg
PF vie longue	50 kg

#### Page 14. Figure 3.

La légende doit être lue comme suit :

Figure 3. Contribution de l'inventaire initial d'un combustible irradié à 33 000 MWj/t au risque potentiel par ingestion ; doses exprimées en Sv/TWhé d'après la CIPR-68 (source : thèse de Stéphanie Sala, Université de Provence, le 26 juin 1995).

#### Page 15. Tableau II.

La ligne correspondant à la *Forme physique* doit être complétée (dernière colonne) :

Forme physique des boues de précipitation : Bitumes

La ligne correspondant aux *Volumes prévus à la conception* doit être lue avec les valeurs suivantes :

PF et actinides mineurs (1ère colonne) : 130

Boues de précipitation (dernière colonne) : 630

#### Page 20. Figure 4.

Dans l'encadré de l'URT, il faut lire 820 t.

### Chapitre 7. Le rôle potentiel du cycle du combustible à base de thorium

de Jean-Paul Schapira

#### Page 157. Tableau I.

Sur la ligne correspondant à l'Inde, le nombre 319 présent en colonne RSE doit être lu en colonne RRA.

---

*SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE*

---

# Les déchets nucléaires

**Un dossier scientifique**

Éditeur : René TURLAY



7, Avenue du Hoggar, B.P. 112  
Zone Industrielle de Courtabœuf  
91944 Les Ulis cedex A, France

## Remerciements

La Société Française de Physique remercie très sincèrement les auteurs qui ont accepté de participer à ce dossier. Ils l'ont fait avec une grande rigueur scientifique et beaucoup de générosité pour la communauté des physiciens français. À leurs noms, nous voudrions également ajouter ceux de Messieurs Henri Vialettes, Yves Roinel et Henri Mouney qui ont fait partie du même groupe de travail et ont participé à plusieurs conférences-débats. Durant l'été dernier, nous avons fait lire les textes accessibles à cette époque par six professeurs de physique de l'enseignement secondaire, Mesdames Jacqueline Chaussade, Annie Ringard et Florence Moreau, Messieurs Pierre Bouissou, Jean-Pierre Bidegaray et Jacques Bouloumié ainsi que Monsieur Jean-Claude Fiz, ingénieur : leurs commentaires nous ont été très précieux et nous en avons tenu compte dans la version qui vous est présentée.

Nous tenons à remercier particulièrement Monsieur René Turlay, organisateur des débats qui ont eu lieu partout en France, à l'initiative de nos sections locales, et se sont terminés par un atelier dans les locaux du Sénat à Paris. C'est également René Turlay qui a accepté la responsabilité de cette publication et mis tout en œuvre pour qu'elle représente l'état actuel de nos connaissances dans ce domaine et qu'elle soit accessible à un grand nombre de nos concitoyens. Il a été aidé dans la réalisation par Monsieur Touwfik Tabti qui a eu la difficile tâche d'assembler les manuscrits, de tout corriger et d'insister auprès de tous pour que l'ensemble soit terminé à temps.

Enfin toute notre reconnaissance va à Monsieur Hubert Curien qui a écrit la préface de ce livre. Nul n'est mieux placé que lui pour comprendre ce que signifie la réalisation d'un tel document, évaluer la qualité des éléments scientifiques apportés qui font appel à des connaissances pluridisciplinaires, et envisager l'importance de la réflexion de tous vis-à-vis des problèmes qui concernent, sans aucun doute, l'évolution de notre Société.

Marianne Lambert  
Présidente de la S.F.P. de février 95 à 97

ISBN : 2-86883-301-2

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les "copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective", et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, "toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite" (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

©Les Éditions de Physique 1997

## Préface

Voici un dossier scientifique sur les déchets nucléaires. Il vous est présenté par la Société Française de Physique, une association plus que centenaire qui groupe librement et représente très authentiquement les physiciens de notre pays. Il est tout naturel qu'une telle société s'investisse dans l'étude de problèmes qui intéressent l'ensemble de nos concitoyens, bien au-delà des lieux où la science s'élabore et où elle est orchestrée par des technologies industrielles nouvelles. La science et les technologies, qui forment la base de notre confort, intellectuel et matériel, sont d'autant plus scrutées qu'elles sont toujours plus présentes autour de chacun de nous au quotidien.

Les scientifiques souffraient d'ailleurs naguère qu'on ne s'intéresse pas assez à eux. Ce n'est pas l'attention, même éventuellement critique, qu'on leur porte qui peut aujourd'hui les troubler. Mais c'est le fait que cet intérêt soit un peu trop souvent focalisé par une optique plus émotionnelle que rationnelle. Expliquer le plus clairement et le plus simplement possible ce qu'on sait, et sans oublier de mentionner ce qu'on ne sait pas encore : voilà le meilleur antidote à la montée de la méfiance et de la désaffection vis-à-vis de la science.

La production d'énergie par la mise en œuvre des réactions nucléaires est l'une des innovations les plus marquantes de notre siècle. Les chercheurs et les techniciens ont été très remarquablement prudents dans la conception, la réalisation et l'exploitation des établissements de production. La sûreté nucléaire a été suivie dans notre pays avec la plus grande attention. Quant au problème du traitement et du stockage des déchets, la solution n'est pas unique. Le principe général de précaution est pour l'instant appliqué, pour qu'un choix d'avenir puisse être fait, sans hâte pernicieuse, entre les diverses voies possibles.

Éviter les excès de la hâte ne signifie nullement se reposer sur un moratoire inconsidérément prolongé. Tel n'est d'ailleurs pas l'esprit dans lequel la loi en a disposé.

Les spécialistes, physiciens, chimistes, géologues, biologistes, travaillent le sujet avec le plus grand sérieux. Il est essentiel que l'opinion publique et les autorités politiques puissent se référer à des dossiers aussi indiscutables qu'accessibles, deux qualités non antagonistes.

J'ai personnellement participé pendant plusieurs années aux réflexions menées au niveau gouvernemental sur l'exploitation de l'énergie nucléaire. Je suis aussi un fervent promoteur de la diffusion de la connaissance scientifique et technique. C'est avec un sincère conviction que je recommande à tous nos concitoyens la lecture de ce remarquable dossier établi par la Société Française de Physique : il est sincère et parfaitement solide sans être péremptoire. Voilà le type de document qu'on aime avoir lu avant de parler.

**Hubert CURIEN**

Membre de l'Académie des Sciences  
Membre de la Société Française de Physique

## Avant-propos

La Société Française de Physique créée en 1873 se donnait pour objet le développement et le rayonnement de la physique. Elle a été longtemps un lieu d'échanges privilégiés où se retrouvaient les physiciens français. Ses premiers congrès étaient un véritable champ d'expériences. C'était en somme une « société savante », une société de savants.

Avec le temps, comme toute société savante, la SFP a pu devenir synonyme de lieu de rencontre de très honorables physiciens supposés regarder le monde extérieur du haut de leurs connaissances.

Tel fut le reproche qui a été soulevé au séminaire de réflexion de la SFP à Orléans en décembre 1991. Au terme d'une discussion animée, il a été constaté que si la SFP tenait remarquablement son rôle sur l'enseignement de la physique et sur la vie professionnelle de jeunes physiciens, elle faisait peu ou rien sur les grandes questions qui concernaient le citoyen. L'information du public avaient déjà été abordée quand on avait conseillé aux scientifiques d'expliquer un peu mieux le but de leur recherche, les moyens financiers utilisés, pour les rapprocher ainsi de leurs concitoyens contribuables.

Il a donc été décidé de choisir pour en débattre des thèmes sur lesquels les scientifiques apportent au citoyen une information honnête, claire, crédible qui lui serait accessible.

Le premier thème choisi a été les déchets nucléaires. Certes preuve de bonne volonté de la part des scientifiques mais aussi d'innocence. La question des déchets nucléaires est une question qui concerne tous les français et qui génère chez tous angoisse et peur. C'est une constatation que nous avons tous pu faire quand ce sujet est abordé dans le milieu du travail, dans la famille ou dans n'importe quelle réunion sociale.

La peur est souvent entretenue par l'ignorance et c'est particulièrement vrai pour ce sujet. Cela a été notre première constatation à la SFP et nous avons décidé de travailler en 3 étapes :

- le débat devait être national et nous devons informer les 18 sections locales de la SFP réparties sur tout le territoire. Ce fut le noyau du groupe de travail créé pour ce débat ;
- nous avons rapidement constaté notre propre ignorance sur ce sujet et nous avons voulu commencer par travailler sérieusement. Nous avons très rapidement pris contact avec les meilleurs spécialistes sur différents domaines liés aux déchets nucléaires et ils ont aussitôt accepté de nous aider. C'est là la force de la SFP ;
- ce n'est qu'après cette préparation que nous avons eu des débats publics dans toutes les régions françaises et dont les orateurs étaient en majorité les experts du groupe de travail, des ingénieurs de l'EDF ou de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA).

## VI

Ces débats publics nous ont convaincus de la nécessité d'aller plus profond, d'expliquer plus clairement et calmement les points scientifiques ou techniques. Car nous avons souvent entendu des réactions généreuses mais dont les arguments relevaient de la foi et non des faits.

Il faut avoir la modestie de dire que pour comprendre le problème des déchets nucléaires, il faut un minimum de patience et de courage pour acquérir les notions de physique, de chimie, de géologie, de médecine nécessaires pour aborder cette question.

Mais les présentations orales ne suffisaient plus et après un atelier fait à Paris en janvier 1995 qui a enthousiasmé beaucoup de physiciens, la SFP nous a demandé d'écrire ce que nous avons amassé sur le sujet pour en faire profiter le plus de monde possible.

C'est la raison d'être de ce dossier scientifique sur les déchets nucléaires et les orateurs de cet atelier ont très généreusement accepté d'écrire leur contribution pour la SFP.

Ce dossier comprend quatre parties - introduction au problème des déchets nucléaires, séparation et transmutation, aspect politique et technique du stockage, et normes de radioprotection et effets biologiques - que nous avons voulu telles pour l'information progressive du lecteur.

Il faut « situer » le problème. Pourquoi ces déchets, d'où viennent-ils, leur volume, leur toxicité, leur durée de vie. Pourquoi sont-ils si angoissants, eux qui meurent malgré tout après quelques centaines de millions d'années, alors que comme le signale un des auteurs de ce livre les déchets normaux ne meurent jamais ! Cette présentation du problème a été écrite par Monsieur Jean-Paul Schapira. La lecture en est très agréable et « enseigne » le lecteur. Bien sûr la physique nucléaire pour réacteurs écrite par Monsieur Hervé Nifenecker est d'une lecture plus difficile, mais comment comprendre et parler avec compétence du problème des déchets nucléaires si on n'aborde pas la physique du neutron ? Il fallait aussi décrire simplement un réacteur nucléaire, c'est ce que Monsieur Massimo Salvatores a accepté de faire tout en soulignant que l'on peut trouver une information plus détaillée sur ce sujet.

Donc les déchets nucléaires produits viennent essentiellement du parc des centrales nucléaires françaises. Si ces déchets mourraient vite, cela ne créerait pas le problème du Nucléaire. Pour ceux dont la période radioactive est de 30 ans (une génération), il existe des solutions de stockage en surface, lieux particulièrement surveillés, qui peuvent résoudre le problème. Ce sont les déchets à vie longue (plusieurs centaines de millions d'années) qui nous posent le problème de notre responsabilité pour les générations futures et nous impose de trouver une solution qui ne mette en rien en danger l'environnement de l'être humain.

En France, on a décidé de retraiter les déchets issus des réacteurs c'est-à-dire de séparer les différents corps produits par la fission. C'est ce que nous explique Monsieur Bernard Boullis dans le chapitre procédés de séparation chimiques. De telles usines de séparation ont été créées dans le monde et c'est La Hague qui en France est la plus importante. Une autre façon de diminuer la toxicité des produits radioactifs est de les « casser » en produits à vie plus courte, voire en produits

stables. C'est la transmutation. Messieurs Massimo Salvatores et Alain Zaetta nous décrivent les recherches et développements entrepris sur ce sujet. Un type de solution est le surrégénérateur Super Phénix. Un programme scientifique se développe fortement sur la transmutation en France. Très récemment le Professeur Carlo Rubbia du CERN (laboratoire européen d'étude et recherche nucléaire) a proposé que l'énergie nucléaire soit produite par des systèmes hybrides, c'est-à-dire un cœur nucléaire à base de thorium bombardé par un accélérateur de protons qui produiraient les neutrons nécessaires à la fission. Cet accélérateur est tout de suite devenu dans les médias un symbole de « sécurité » ! C'est vrai qu'un accélérateur de particules peut s'arrêter en quelques secondes (millisecondes !) et tout le système peut ainsi s'arrêter de fonctionner, ce qui n'est pas le cas d'un réacteur classique à uranium comme nous l'avons vu à Tchernobyl. Bien que très séduisants ces systèmes hybrides doivent encore être étudiés pour en arriver à une solution efficace, rentable et parfaitement sûre. Messieurs Hervé Nifenecker et Jean-Paul Schapira présentent les systèmes hybrides et le cycle du thorium. Tout cela est en début d'expérimentation.

Quelles que soient les solutions de production d'énergie nucléaire, l'existence de réacteurs pose le problème du stockage des déchets radioactifs. Par une loi de décembre 1991, le Parlement français a demandé à la communauté scientifique d'étudier ces lieux de stockage. La solution devra être proposée au Parlement en 2006. Nous revenons donc devant le citoyen.

Monsieur Maurice Allègre nous présente très clairement les conséquences de cette loi de 1991 et toutes les recherches qui sont en cours. Trois sites de laboratoires souterrains ont été sélectionnés en France pour y mener toutes les études sur le passage dans la biosphère des déchets radioactifs stockés. Ces sites n'auront aucun produit radioactif déposé avant 2006.

Le confinement des produits radioactifs demande aussi une technologie poussée pour « emballer » les déchets et les isoler, par plusieurs barrières, du contact avec l'environnement. Monsieur Denis Alexandre nous décrit très simplement les techniques actuelles.

Mais où mettre ces produits emballés ? Le Professeur Ghislain de Marsilly expose par un véritable cours de géologie toutes les possibilités. Il s'agit là de choisir des lieux géologiques stables sur plusieurs centaines de milliers d'années, temps qui pour le géologue est encore un temps court. De tels lieux existent sur la planète mais la question de la protection contre l'intrusion humaine reste peut-être le point le plus interrogatif du stockage en général.

Enfin quel est le danger des déchets radioactifs ? Monsieur Henri Métivier nous brosse un tableau très complet de la manière dont s'établissent les doses de rayonnement admises pour l'individu. Ces normes établies par des comités internationaux sont sérieusement discutées puisqu'elles gèrent toute la radioprotection de la planète. Leur connaissance par chacun d'entre nous en fait le départ de toutes discussions efficaces et sérieuses sur les déchets nucléaires. Ces doses sont faibles et n'ont rien à voir quant à leurs effets avec les fortes irradiations dues aux explosions nucléaires ou aux accidents des réacteurs. En connaître les



## VIII

effets demande des études longues. Le Professeur Maurice Tubiana nous présente des résultats récents et les hypothèses les plus rigoureuses sur ce sujet.

Vous constaterez qu'il n'y a pas dans tous les sujets abordés dans ce dossier de proposition de « solution pour les déchets nucléaires ». Proposer aujourd'hui la solution au problème des déchets nucléaires serait un peu caricatural et une agression contre tous les chercheurs, ingénieurs, médecins qui se penchent sur ce problème avec toute leur conscience, leurs connaissances et leur compétence : il faut encore chercher et réfléchir.

Si nous voulons comprendre les évolutions des recherches pour trouver une solution pour 2006, il convient que nous puissions réunir au mieux les travaux entrepris, les hésitations, les échecs et sans aucun doute les progrès pour arriver à une solution sage et efficace.

Le dossier scientifique sur les déchets nucléaires de la Société Française de Physique a l'ambition de vous faire faire un bout de chemin dans ce sens.

**René TURLAY**

Président de la SFP de 1991 à 1992

# SOMMAIRE

---

## INTRODUCTION AU PROBLÈME DES DÉCHETS NUCLÉAIRES

1.	<i>Le dossier des déchets nucléaires</i>	3
	Jean-Paul SCHAPIRA	
2.	<i>Notions élémentaires sur les réacteurs nucléaires</i>	25
	Massimo SALVATOIRES	
3.	<i>Éléments de physique nucléaire pour réacteurs</i>	37
	Hervé NIFENECKER	

---

## SÉPARATION ET TRANSMUTATION

4.	<i>Retraitement et séparation des radionucléides à vie longue</i>	69
	Bernard BOULLIS	
5.	<i>Transmutation : physique et stratégies</i>	93
	Massimo SALVATOIRES et Alain ZAETTA	
6.	<i>Les systèmes hybrides de production d'énergie</i>	123
	Hervé NIFENECKER	
7.	<i>Le rôle potentiel du cycle du combustible à base de thorium</i>	155
	Jean-Paul SCHAPIRA	

---

## ASPECTS POLITIQUE ET TECHNIQUE DU STOCKAGE

8.	<i>La gestion des déchets radioactifs</i>	171
	Maurice ALLÈGRE	
9.	<i>Conditionnement des déchets nucléaires</i>	181
	Denis ALEXANDRE	
10.	<i>Enfouissement des déchets nucléaires en formation géologique</i>	203
	Ghislain de MARSILY	

---

## NORMES DE RADIOPROTECTION ET EFFETS BIOLOGIQUES

11.	<i>Principes et normes de radioprotection</i>	249
	Henri MÉTIVIER	
12.	<i>Effets cancérogènes des faibles doses de rayonnements ionisants</i>	273
	Maurice TUBIANA	

---

<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>297</b>
Annexe. Tableau périodique des éléments simples	306



# **Introduction**

## **au problème des**

## **déchets nucléaires**



# 1 Le dossier des déchets nucléaires

---

Jean-Paul Schapira<sup>(★)</sup>

## 1. Introduction

Un certain nombre d'activités industrielles, médicales ou de recherche portent sur des matières contenant des corps radioactifs ou mettent en œuvre des rayonnements nucléaires. Elles engendrent des déchets dits radioactifs, qui peuvent être sous forme gazeuse, liquide ou solide. L'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE en a donné une définition communément adoptée :

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

Le terme *déchet nucléaire* est souvent employé pour désigner les déchets radioactifs engendrés par la mise en œuvre de l'énergie de fission (ou de fusion) nucléaire pour la production d'énergie ou d'armes nucléaires.

Cette définition renvoie à deux idées, celle de *nocivité* qui nécessite un contrôle, et celle d'*absence d'usage*. Aussi, la notion de déchet est-elle essentiellement contingente. En effet, la nocivité est évidente dès lors que l'on a

---

(★) Institut de physique nucléaire, 91406 Orsay Cedex.

affaire à des matériaux très contaminés ou irradiants, comme le sont par exemple pratiquement tous les déchets issus des réacteurs nucléaires. Du côté des faibles et très faibles activités, la limite est plus difficile à établir, et dépend très largement du contexte socio-économique et de la perception des risques. C'est ainsi que, par mesure de précaution, des matériaux soupçonnés de contamination peuvent être considérés comme des déchets. Par ailleurs, la référence à un usage (ou à une valorisation) est également sujette à variation et renvoie à des critères essentiellement économiques qui tiennent compte, par exemple, de la situation énergétique. C'est le cas du plutonium qui est considéré comme une matière nucléaire précieuse dans un contexte de développement fort du nucléaire pouvant conduire à des risques de raréfaction de l'uranium, ou au contraire, comme un simple déchet lorsque l'on envisage, comme c'est le cas aujourd'hui aux États-Unis ou en Suède, de le laisser dans les combustibles usés pour être stocké définitivement en couches géologiques profondes. En d'autres termes, des matières nucléaires nocives, comme le plutonium ou l'uranium irradié, peuvent voir leur statut changer et devenir de fait des déchets. La politique de gestion de ces matières, provenant des combustibles usés déchargés des réacteurs nucléaires, reflète dans une large mesure des choix énergétiques d'un pays qui peuvent ainsi conditionner indirectement tout un pan de la politique des déchets nucléaires.

Le problème des déchets nucléaires est devenu aujourd'hui un enjeu très important : il en va, pour une large part, de la crédibilité des promoteurs et des exploitants de l'énergie nucléaire, ainsi que des pouvoirs publics, et au-delà, de la possibilité de poursuivre, voire d'entreprendre un programme électronucléaire. La mise en œuvre d'une politique de gestion des déchets nucléaires rigoureuse, ouverte et débattue démocratiquement s'impose aujourd'hui aux décideurs. En France notamment, une loi, votée par le Parlement le 30 décembre 1991, stipule les conditions pour la mise en œuvre d'une telle politique, et définit à cette occasion trois axes (la séparation et la transmutation, le stockage profond, le conditionnement et l'entreposage) autour desquels les recherches devront être simultanément conduites en vue d'une décision à prendre en 2006 pour une gestion définitive des déchets de haute activité et à vie longue issus des réacteurs.

Un sondage récent, réalisé en France, montre que les déchets nucléaires sont considérés comme la première cause de risque pour l'environnement. La perception que le public a de la nocivité des déchets nucléaires ne saurait se réduire à la seule manifestation d'une peur irrationnelle, fondée sur l'ignorance de données scientifiques. Elle résulte également de la connaissance diffuse, parfois déformée, de faits et de situations réelles, notamment :

- la présence dans certains déchets de corps radioactifs hautement radiotoxiques et à vie très longue, qui nécessite un confinement par rapport à la biosphère pendant des durées dépassant largement celles des sociétés humaines et pouvant se chiffrer en milliers de siècles ;
- l'existence d'un passif résultant de pratiques anciennes, peu soucieuses de la préservation de l'environnement, et qui laissent aujourd'hui quelques situations peu satisfaisantes. Citons la contamination de l'environnement par des rejets

radioactifs et par des déchets de toute sorte, en provenance de programmes nucléaires militaires qui se mirent en place à l'époque de l'après-guerre (essentiellement aux États-Unis et dans l'ex-Union soviétique). Dans une moindre mesure, cela est également le cas de l'entreposage en vrac de déchets très irradiants à Marcoule et à La Hague provenant du retraitement passé de combustibles de la filière graphite-gaz, et notamment des premiers réacteurs plutonigènes de Marcoule. Récemment, une controverse est apparue à propos de la fermeture de l'ancien centre de stockage de la Manche dont le remplissage a débuté au début des années 1960, à l'occasion du rapport de la Commission Turpin (*Le Monde*, 18 juillet 1996) ;

- plus généralement, le constat d'un certain déficit démocratique pour ce qui concerne l'information et les décisions dans le domaine nucléaire, alimentant une méfiance du public vis-à-vis des acteurs concernés par la production ou la gestion des déchets nucléaires soupçonnés souvent de cultiver le secret en la matière.

Cela étant, il convient de souligner que, tant que l'on raisonne sur des échelles de temps court, qui permettent toujours un certain degré de réversibilité, la gestion des déchets nucléaires ne pose pas en principe de problèmes techniques insurmontables, et se présenterait même sous un jour plutôt favorable :

- contrairement au cas de la plupart des déchets industriels toxiques, les déchets nucléaires peuvent en effet être classés en un nombre limité de catégories bien définies, comme nous le verrons plus loin en détail. Mis à part les résidus de l'extraction de l'uranium, les quantités de déchets nucléaires (environ 80 fois plus faibles que celles des déchets classés toxiques) occupent des volumes et des emprises au sol limités, même si certains déchets présentent des nuisances bien plus importantes que celles des déchets industriels. Elles peuvent enfin être facilement corrélées à la production d'électricité d'origine nucléaire, et donc prévisibles ;
- les producteurs de déchets nucléaires (électriciens, industriels du cycle) sont peu nombreux, identifiés et souvent dotés d'un statut public ou parapublic. L'exercice du contrôle technique de leurs activités devrait de ce fait être plus aisé que dans le cas d'une myriade de producteurs, dès lors que le principe de séparation des responsabilités est clairement appliqué entre producteurs, gestionnaires des déchets et autorités réglementaires ;
- les connaissances scientifiques et techniques concernant les déchets sont aujourd'hui très développées et font l'objet d'efforts importants au sein des organismes nationaux et internationaux en charge de ces problèmes, très supérieurs à ce qui est consenti dans d'autres secteurs industriels présentant également un impact sur l'homme et l'environnement. Par exemple, les effets biologiques des rayonnements, étudiés depuis les années 1920, font l'objet d'une mise à jour permanente de la part de la CIPR, Commission internationale de protection radiologique, qui recommande des normes de protection généralement adoptées par les États.



Aussi devrait-il être possible de gérer techniquement les déchets, du moins sur le moyen terme, c'est-à-dire sur une durée pendant laquelle une organisation de la société devrait permettre une surveillance et l'application, le cas échéant, de mesures correctives. C'est le domaine typique de l'entreposage surveillé, ou encore celui du stockage définitif en surface, comme celui qui a été récemment mis en activité à Soulaïnes dans l'Aube. Dans ce dernier cas, la sûreté repose essentiellement sur une limitation de l'inventaire en corps à vie longue dans les fûts de déchets stockés, telle qu'une banalisation devient possible après une période de surveillance de 300 ans. La qualité d'une telle gestion repose pour l'essentiel sur la capacité politique d'appliquer effectivement les concepts techniques sur le terrain. On observe, malgré tout, des limites à cette qualité en raison des contraintes économiques.

En revanche, la gestion à long terme des déchets nucléaires à vie longue pose des problèmes d'une autre dimension. On doit en effet apporter la preuve que l'on est capable de neutraliser l'action nocive de ces déchets, sur des périodes de temps durant lesquelles on ne peut raisonnablement compter sur une surveillance institutionnelle. Ceci pose des problèmes majeurs à la fois scientifiques (matériaux, géologie), techniques et éthiques. Ces problèmes du long terme apparaissent surtout pour les déchets hautement radioactifs et à vie longue produits dans les réacteurs, pour lesquels le stockage en couches géologiques profondes est partout envisagé dans le monde.

Nous allons tenter dans ce dossier d'identifier dans un premier temps les caractéristiques de production des déchets nucléaires et les options de gestion envisagées, en s'appuyant sur celles mises en œuvre en France, puis dans un deuxième temps de décrire des données géopolitiques relatives aux principaux pays concernés par ce problème.

## **2. Production et gestion des matières nucléaires et des déchets dans le cycle du combustible**

### **2.1. Généralités et risques liés aux déchets**

Pour fonctionner, un réacteur nucléaire utilise un combustible qui contient la matière fissile nécessaire à l'entretien des réactions en chaîne. La fabrication d'un tel combustible n'est pas triviale et nécessite la mise en œuvre de toute une série d'opérations industrielles en *amont* et en *aval* du réacteur. La mise en œuvre de l'ensemble de ces opérations est complexe. Elle porte sur les *matières nucléaires* nécessaires à la fabrication des combustibles et s'accompagne d'une production de *déchets* et de nouvelles matières nucléaires, en principe utilisables.

Il est naturel de comparer les flux de matières nucléaires et de déchets au service rendu, ce qui peut être fait en les normalisant à la production d'électricité. Compte tenu de ce que la filière à eau est la plus répandue au plan mondial, et notamment en France, on prendra comme cas de référence, *celui d'un réacteur à eau pressurisée (REP) de 900 MW<sup>(1)</sup> du parc EDF qui fonctionnerait avec un facteur de charge de 70 %, produisant donc 5,52 milliard de kWhé (ou 5,52 TWhé) par an.*

La figure 1 résume la succession des opérations de la mine au stockage et indique les flux de déchets et de matières nucléaires associés au fonctionnement annuel d'un tel réacteur, dans le cas de référence retenu en France qui est celui du retraitement tel qu'il est pratiqué aujourd'hui à l'usine de La Hague.

Les flux de matières ne suffisent pas pour caractériser les risques que peuvent présenter les déchets ou les matières nucléaires. Ces risques peuvent être de nature différente :

- risques liés aux effets biologiques des rayonnements qu'émettent les corps radioactifs contenus dans ces matières, c'est le risque radiologique ;
- risques liés aux effets biologiques ou physiques (par exemple explosion) liés à la nature chimique de certains corps contenus dans ces matières, c'est le risque chimique ;
- risques liés à certaines propriétés physiques, dont la plus importante est la chaleur que dégagent par exemple les déchets de haute activité ou encore, dans certaines conditions de mélange isotopique, le plutonium.

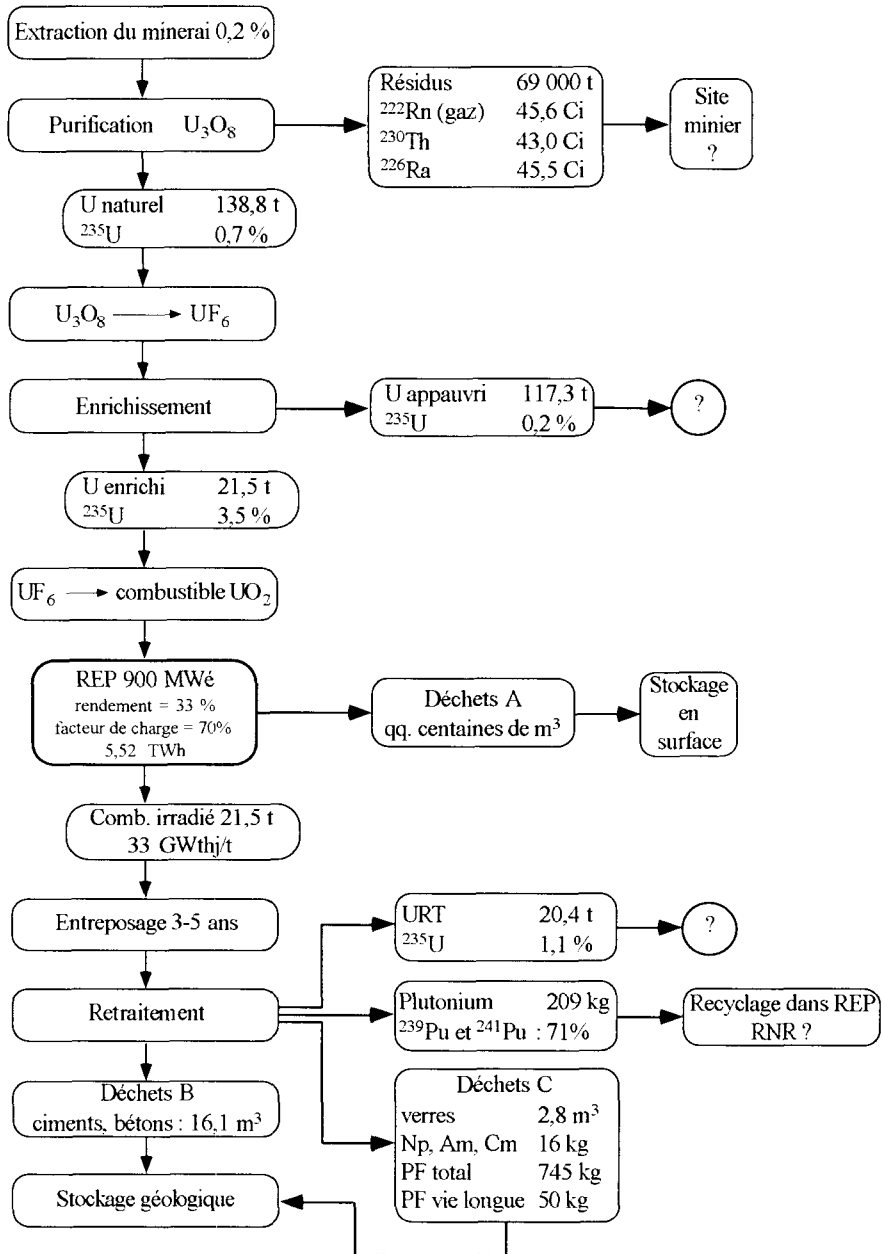
## 2.2. Déchets au niveau de l'extraction de l'uranium

La première source de production de déchets dans le cycle du combustible est l'extraction de l'uranium à partir de minerais dont les teneurs les plus courantes se situent autour de 0,1 % à 0,5 %. Après extraction chimique, selon un procédé généralement fondé sur une solubilisation sélective de l'uranium dans l'acide sulfurique, la totalité de l'uranium non extrait (quelques %) et de ses descendants se retrouvent sous forme de résidus insolubles (des résidus insolubles proviennent également du traitement des effluents liquides).

Ces déchets sont caractérisés par une durée de vie très longue, gouvernée par la période de 77 000 ans du thorium 230, par de grandes quantités (environ 50 millions de tonnes en France) et par une très faible activité, de l'ordre de quelques mCi d'émetteurs  $\alpha$  par tonne (ou quelques  $3,7 \times 10^7$  Bq/t), selon que l'on compte ou non les descendants du radon ( $^{222}\text{Rn}$ ).

---

(1) Pour mégawatt électrique.



**Figure 1 :** Les diverses opérations du cycle fermé c'est-à-dire avec retraitement et recyclage des combustibles usés à La Hague (1995, les pertes d'uranium et de plutonium sont de 0,12 % dans tous les déchets).

Le principal risque radiologique est lié à l'exhalation permanente du gaz radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) dont les descendants peuvent être fixés dans les poumons suite à son inhalation (risques aux travailleurs et au public). Il existe également un risque dû au transport du radium par l'eau. Dans la nouvelle classification proposée par la Direction de la Sûreté des installations nucléaires, la DSIN, ces déchets appartiennent à ceux de très faible activité et à vie longue, pour lesquels un mode de gestion adapté aux caractéristiques de ces déchets (volumes importants et présence de radon) consiste essentiellement à surveiller, à stabiliser le site et à le recouvrir avec un matériau de faible perméabilité (argile par exemple) et suffisamment épais (environ 1 mètre) pour stopper les émanations de radon. Le risque résiduel qui en résulterait peut être estimé à partir de scénarios plausibles d'évolution physique du site et d'intrusion humaine. L'impact de tels scénarios pourrait, selon des premières estimations effectuées à l'Institut de protection et de sûreté nucléaire, dépasser la limite de 1 mSv par an recommandée par la CIPR-60 pour le public. Une telle valeur est à comparer aux impacts à long terme, apparemment plus faibles, des autres activités du cycle nucléaire sur le public.

### 2.3. Matières nucléaires et déchets au niveau de l'enrichissement isotopique de l'uranium

Le fonctionnement des réacteurs à eau nécessite un combustible d'oxyde d'uranium, enrichi en son isotope  $^{235}\text{U}$ , entre 3 et 5 % selon le taux d'irradiation que l'on veut atteindre. Ainsi, dans le cas de référence considéré ici, un enrichissement de 3,5 % est nécessaire pour atteindre un taux de combustion de 33 GWj/t. C'est le procédé par diffusion gazeuse qui reste de loin le procédé d'enrichissement le plus répandu au plan mondial.

Du point de vue des déchets, une usine d'enrichissement peut rejeter de faibles quantités de produits chimiques intervenant dans le procédé. À ce stade, il n'y a cependant pas de production de déchets nucléaires si ce n'est, indirectement, ceux liés à l'importante consommation d'énergie électrique, lorsque celle-ci est d'origine nucléaire, comme c'est le cas sur le site de Tricastin. En revanche, la plus grosse partie de l'uranium naturel entrant dans une telle usine sous forme d'hexafluorure d'uranium, se retrouve sous forme d'uranium appauvri en  $^{235}\text{U}$  (environ 85 %, selon la teneur isotopique en  $^{235}\text{U}$  de l'uranium appauvri qui est de l'ordre de 0,25 %). Cet uranium dit de *rejet* peut être réutilisé comme support dans des combustibles chargés en plutonium (c'est le cas des combustibles mixtes d'oxyde d'uranium et d'oxyde de plutonium, appelés MOX) ou comme matière fertile placée dans les couvertures des surrégénérateurs. Mais aujourd'hui, ces usages ne concernent que quelques pour cent de la totalité de l'uranium de rejet, et cette matière nucléaire inutilisable est de fait considérée à terme comme un déchet de très faible activité mais à vie très longue. On doit dans cette dernière hypothèse tenir compte de cet



# LES DÉCHETS

# NUCLÉAIRES

## un dossier scientifique

La question des déchets nucléaires nous concerne tous et génère souvent angoisse et peur. À l'issue des débats publics organisés par la Société Française de Physique, nous avons souhaité, par ce dossier scientifique, éclairer le lecteur sur cette question d'actualité en expliquant ce que l'on sait sans oublier de mentionner ce que l'on ne sait pas encore.

Ce dossier comprend quatre parties :

Introduction au problème des déchets nucléaires

*J.-P. Schapira, M. Salvatores et H. Nifenecker*

Séparation et transmutation

*B. Boullis, M. Salvatores, A. Zaetta,*

*H. Nifenecker et J.-P. Schapira*

Aspects politique et technique du stockage

*M. Allègre, D. Alexandre et G. de Marsily*

Normes de radioprotection et effets biologiques

*H. Métivier et M. Tubiana*

*C'est avec une sincère conviction que je recommande à tous nos concitoyens la lecture de ce remarquable dossier établi par la Société Française de Physique : il est sincère et parfaitement solide sans être péremptoire. Voilà le type de document qu'on aime avoir lu avant de parler.*

*Hubert Curien*

ISBN : 2-86883-301-2



9 782868 833013

les éditions  
  
de physique