



InterSections

Le nucléaire : Un choix raisonnable ?

Hervé Nifenecker

Le nucléaire : un choix raisonnable ?

Hervé Nifenecker

Président d'honneur de « Sauvons le Climat »



Imprimé en France
ISBN : 978-2-7598-0574-7

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 1^{er} 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.

© EDP Sciences 2011



Préface

Parmi les grands défis auxquels notre société sera confrontée au cours des prochaines décennies, les questions énergétiques donnent lieu à de multiples discussions. En effet, non seulement le mode de vie mais aussi et surtout des problèmes vitaux comme l'alimentation ou la santé en dépendent. La limitation des ressources d'énergie, les aspects économiques et sociaux, les nuisances, les interventions gouvernementales alimentent ainsi quotidiennement les journaux imprimés ou télévisés et suscitent la publication de nombreux ouvrages plus ou moins spécialisés.

Cette profusion ne répond pourtant pas pleinement aux interrogations des citoyens, qui souhaitent disposer d'une information à la fois abordable et objective. En particulier, l'énergie nucléaire, qui occupe une place centrale dans les préoccupations de tous ceux qui s'intéressent aux questions énergétiques, donne lieu à des controverses, des non-dits ou des affirmations tranchées, laissant souvent perplexe l'auditeur ou le lecteur.

C'est cette constatation qui a incité Hervé Nifenecker à rédiger le présent ouvrage. Celui-ci présente l'originalité d'être organisé en une succession d'une vingtaine de courts chapitres, dont chacun apporte une réponse argumentée à une interrogation sur laquelle circulent trop souvent des idées simplistes ou infondées. Cette structure devrait en faciliter la lecture, puisque la plupart des chapitres sont indépendants.

L'auteur, physicien nucléaire, a été amené depuis longtemps à s'intéresser aux problèmes de l'énergie, notamment nucléaire ; il révèle dans l'introduction son parcours personnel dans ce domaine. J'ajoute qu'il a fondé il y a quelques années l'association *Sauvons le Climat*, qui collecte et diffuse des informations scientifiquement validées sur l'influence possible de l'homme sur le climat.

La même approche scientifique prévaut dans le présent texte, de même que dans les remarquables rapports de l'Académie des sciences ou de l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, méconnus du grand public et trop souvent négligés par l'exécutif. Hervé Nifenecker réussit ici à concilier une telle rigueur avec un agrément de lecture. En tant que chercheur, il sait analyser les facettes diverses et complexes de chacune des questions qu'il aborde, à en mettre en évidence les tenants et aboutissants, à discuter les conséquences possibles, directes ou indirectes, des actions envisagées (ainsi que de l'inaction). Il met clairement en évidence les contraintes imposées par les lois de la nature, souvent ignorées des polémistes ou des adeptes du « il n'y a qu'à ».

De plus, l'auteur s'interdit d'asséner des certitudes ; il accompagne ses assertions de leur degré de confiance, comme il sied à toute vérité scientifique. Enfin, son expérience de physicien l'amène tout naturellement à se baser sur des estimations chiffrées, visualisées par des graphiques ; des comparaisons quantitatives, même approchées, sont en effet indispensables pour peser les pour et les contre.

Il faut souhaiter que cet ouvrage permette de dissiper des préjugés courants et qu'il aide à l'élaboration de politiques rationnelles.

Roger Balian,
membre de l'Académie des sciences

Tables des matières

Préface	iii
Partie 1 – La position de la France dans le nucléaire mondial	1
1 • La France est-elle le pays le plus avancé dans le nucléaire ?	5
La France contrôle l'ensemble du cycle nucléaire	5
Alors, la France est-elle le pays le plus avancé dans le nucléaire ?	23
Le nucléaire est-il un gage d'indépendance énergétique pour la France ?	23
Le combat pour le nucléaire n'est-il pas perdu d'avance devant l'hostilité des populations ?	25
2 • Le nucléaire manque-t-il de transparence ?	27
Une tradition de secret aux origines	27
Débattre sur les choix fondamentaux	29
Organiser la transparence sur les risques	30
Partie 2 – Les risques civils du nucléaire	37
3 • Toute dose de radiation serait-elle dangereuse ?	39
Un juge de paix, la CIPR	39

Les unités de mesure de l'effet des rayonnements sur la santé	40
La relation entre les doses reçues et les effets sanitaires	41
La controverse sur les faibles doses	42
Les arguments s'opposant à l'extrapolation de la RLSS aux faibles doses	43
Les curiosités de la loi linéaire sans seuil	47
L'interprétation des recommandations de la CIPR	49

4 • Combien Tchernobyl a-t-il fait de victimes ? 53

Les victimes parmi les travailleurs	54
Les cancers de la thyroïde chez les enfants	54
Les leucémies et les autres cancers	55
Autres effets	56
Prévisions	56
Une mauvaise gestion post-catastrophe	57
Quelques remarques de bon sens	58

5 • L'augmentation observée du nombre de cancers de la thyroïde en France est-il dû à Tchernobyl ? 59

L'évolution du nombre de cancers de la thyroïde en France depuis 1975	59
Un problème juridique	61

6 • Un attentat terroriste sur une centrale nucléaire serait-il pire que le 11 septembre ? 63

Une centrale n'est pas une cible si facile	64
Les gestes à connaître en cas de relâchement de radioactivité	65
Les conséquences à court terme et à long terme	65

7 • Doit-on craindre une catastrophe nucléaire en France ? 67

Les caractéristiques des réacteurs RBMK	68
L'accident	68
Un Fukushima français est-il possible ?	70
Ce que pourrait être un accident nucléaire grave en France	76
Finalement, après 40 ans de production d'électricité nucléaire sans accident, peut-on dire que le nucléaire civil est sûr ?	77

Partie 3 – L'économie du nucléaire 81

8 • Le nucléaire peut-il résoudre les problèmes de l'énergie ? 83

Les besoins actuels en uranium	83
Les réserves « classiques » d'uranium	84
L'uranium des phosphates	86

L'uranium des océans	86
Une question de prix...	88
Vers une pénurie d'uranium ?	88
Une meilleure utilisation du combustible nucléaire	88
Quels surgénérateurs ?	91
La voie du thorium	93
9 • Le nucléaire n'a-t-il pas bénéficié de la recherche publique beaucoup plus que les énergies renouvelables ?	97
Les budgets français pour le nucléaire	97
Les budgets français pour les énergies renouvelables	98
Entre CEA et EDF	98
La recherche dans les autres pays	100
Des soutiens pervers	100
10 • Dans quelle mesure tient-on compte du démantèlement des centrales dans le calcul des coûts ?	103
Comment estimer les coûts de démantèlement	103
Comment gérer les provisions pour le démantèlement	104
11 • En tenant compte des coûts externes le nucléaire ne devient-il pas beaucoup plus cher ?	107
Le coût environnemental du charbon	107
Les bénéfices externes	110
Le coût total des différentes formes d'énergie	111
12 • L'EPR et les autres réacteurs ne coûtent-ils pas beaucoup trop cher ?	113
Dérapages regrettables sur l'EPR d'Olkiluoto	113
Cela va un peu mieux à Flamanville	113
Des doutes sur la sûreté du système contrôle-commande ?	114
Investir dans un EPR reste rentable	115
Mais la mise initiale reste dissuasive	115
Amorti, le nucléaire est imbattable par les centrales fossiles	116
La dérégulation et la mise en concurrence ont-elles été bénéfiques ?	117
La privatisation en cours du secteur électrique est-elle compatible avec le maintien d'un haut niveau de sûreté des réacteurs ?	118
Partie 4 – Le développement du nucléaire	121
13 • Les réacteurs nucléaires ne manquent-ils pas de souplesse ?	123
Les modes de réglage par tranche nucléaire	123

Le mode de fonctionnement de base	124
Le mode de fonctionnement dit de suivi réseau	124
Réglage manuel de la puissance	124
Le programme de chaque tranche dans le parc nucléaire	125
100 % nucléaire, est-ce possible ?	126
A-t-on besoin de centrales fossiles ?	126

14 • La multiplication des réacteurs ne conduit-elle pas à une prolifération accrue des armes nucléaires ?

131

Retour sur l'Histoire	131
Les sources des explosifs nucléaires	133
Le plutonium extrait des réacteurs REP peut-il servir à fabriquer une bombe ?	135
Et le danger terroriste ?	136

15 • Le traité de non-prolifération (TNP) sert-il encore à quelque chose ?

137

Et d'abord qu'est-ce que le TNP ?	137
Est-il possible de sortir du traité ?	139
Les acquis du traité	139
Un traité inégalitaire est-il durable ?	139
Les zones problématiques	140
Proposition pour un nouveau traité basé sur la transparence et le contrôle	140

16 • L'énergie nucléaire ne représentant que 2 % de la consommation énergétique son développement vaut-il la peine ?

143

Le rôle crucial de l'électricité	144
Comment produire l'électricité sans émission de CO ₂ ?	147

17 • Ne devrait-on pas construire tout de suite des réacteurs de génération IV plutôt que des EPR ?

151

Les réacteurs à gaz à haute température (RGHT)	151
Les réacteurs surgénérateurs	152

Partie 5 – Les déchets nucléaires

155

18 • Le vrai problème n'est-il pas qu'on ne sait pas gérer ces déchets nucléaires dangereux pendant des millions d'années ?

157

La production de déchets	158
Le stockage en site géologique profond	160

La séparation-transmutation	162
La question du financement de la gestion des déchets	162
19 • Et quid du coût de gestion des déchets ?	165
20 • Le nucléaire n'est-il pas aussi responsable d'émissions de CO₂ ?	169
Conclusion	173
Annexes	179
1 • Les unités	181
Unités d'énergie	181
Unité de longueur	182
Unité de surface	182
Unités mesurant l'activité des sources radioactives	182
Unités d'exposition aux radiations	182
INES : Échelle de gravité des événements nucléaires	183
2 • Les réactions nucléaires	185
Le noyau	185
Le processus de fission	188
Autres interactions entre les neutrons et les noyaux	190
Les sections efficaces typiques	191
3 • Le fonctionnement d'un réacteur	193
La réaction en chaîne	193
Le contrôle de la réactivité	195
4 • Les différents types de réacteurs	199
Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR)	199
Les réacteurs à eau pressurisée (REP) ou bouillante (REB)	200
Les réacteurs à eau lourde (Candu)	200
Les RBMK de type Tchernobyl	201
Glossaire	203
Remerciements	213

Vj ku'r ci g'kpvgpvkpc m('ighv'dnc pm

Partie

1

**La position de la France
dans le nucléaire mondial**

La production d'électricité d'origine nucléaire est un des sujets de polémique les plus marqués dans la société française et, plus généralement, européenne. Le dialogue est-il encore possible entre pro- et antinucléaires ? Relève-t-il d'un affrontement quasi religieux ou laisse-t-il encore la place à une argumentation rationnelle ? Essayer de faire un inventaire, même partiel, des questions posées sur et par le nucléaire et tenter d'y répondre est un pas dans la direction d'une recherche de la rationalité que j'estime indispensable pour éclairer les choix collectifs difficiles que commandent à la fois l'épuisement programmé des ressources fossiles et l'application nécessaire d'un véritable principe de précaution au problème climatique.

Une des caractéristiques du dialogue de sourds entre pro- et antinucléaires est que ces derniers accusent les premiers d'être des représentants du « lobby nucléaire ». Et, par ailleurs, il est vrai que de nombreux « pronucléaires » ont, de près ou de loin, touché au nucléaire pendant leur carrière professionnelle. C'est l'existence de ces procès d'intention qui m'amène à parler ici, et pour la première fois en public, de ma propre évolution professionnelle et scientifique. De 1958 à 1986 j'ai poursuivi une carrière de physicien des noyaux et des particules au CEA, d'abord à Saclay, puis à partir de 1977 à Grenoble. De 1986 à 2008, j'ai travaillé au Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie (LPSC), dépendant de l'Institut de physique nucléaire et des particules (IN2P3) au CNRS. Jusqu'en 1992 je me suis concentré sur des études fondamentales portant sur une grande variété de réactions entre noyaux et je regardais de loin les travaux de mes collègues qui travaillaient sur l'électronucléaire¹. À Saclay, mon activité syndicale m'avait mis en contact avec des physiciens et des chimistes qui, tout en étant passionnés par leur travail, et peut-être même pour cela, étaient d'actifs militants syndicalistes au sein de la CFTC devenue CFDT. Deux très proches amis ont été successivement secrétaires généraux du syndicat CFDT de l'énergie atomique. L'un a fait ultérieurement une brillante carrière, interrompue malheureusement trop tôt, au sein de Framatome, l'autre après quelques années comme permanent syndical à l'échelon national de la CFDT, a été un des fondateurs de l'AFME (précurseur de l'Ademe). Il est devenu un des scientifiques référents de la mouvance antinucléaire. Tout cela pour dire que l'appartenance passée au CEA ne signifie pas automatiquement qu'on est pronucléaire. En 1973, alors que j'étais aux États-Unis, mes amis de la CFDT publièrent le premier livre indépendant et (mais) documenté sur l'industrie nucléaire en France intitulé *L'électronucléaire en France*. Avant mon départ aux États-Unis j'avais participé au travail qui devait donner naissance à ce livre. Notre action fortement contestatrice au CEA pendant et après Mai 68 ne nous mirent sûrement pas en odeur de sainteté au sein de l'organisme. Je dois toutefois préciser que, en tant que chercheur fondamental, j'ai trouvé au CEA des conditions extrêmement favorables à la poursuite de mon activité, dans une atmosphère de liberté intellectuelle remarquable.

Pendant les années qui suivirent Mai 1968 et le départ du Général De Gaulle en 1969 le CEA connut des années très difficiles puisque l'abandon de la filière

1. Tout en ayant une position hostile au nucléaire militaire.

française (UNCG) et le choix de la filière REP (Westinghouse) avait posé la question de l'existence même de l'organisme de recherche.

L'intensité de la lutte syndicale relayée par celle de la très grande majorité des agents a sans doute joué un rôle décisif dans son maintien et dans sa reconversion pour « franciser » la filière américaine. Est-il vraisemblable que les animateurs de ces mouvements sociaux très durs soient devenus des agents du « lobby nucléaire » ? La même remarque s'applique à de nombreux syndicalistes d'EDF. Alors, la question ne mérite-t-elle pas d'être posée : comment se fait-il que la vaste majorité des anciens du nucléaire, désormais retraités et donc complètement indépendants, connaissant parfaitement ses dangers potentiels puisque les ayant côtoyés tous les jours ou presque, soient d'ardents défenseurs de cette forme d'énergie ? N'auraient-ils pas droit à participer au débat public sans être accusés de malhonnêteté ? Leur apport « informé » ne doit-il pas être pris en considération ?

En 1992, la collaboration avec Carlo Rubbia sur les réacteurs hybrides (ou encore amplificateurs d'énergie ou encore le Rubbiatron) attira mon attention, à la fois sur la question des déchets nucléaires, sur celle des ressources fissiles et sur celle du réchauffement climatique. Il m'apparut rapidement que ces trois questions étaient intimement liées : on ne pouvait trouver une solution satisfaisante à la question des déchets nucléaires sans répondre à celle de l'avenir du nucléaire : si le nucléaire n'avait pas d'avenir à long terme au niveau mondial, la seule chose à faire raisonnablement avec les déchets était de les enterrer et les recherches sur leur transmutation n'avaient pas de sens. Pour répondre à la question de la gestion des déchets, telle que la Société française de physique se l'était posée¹, il fallait donc examiner le rôle possible du nucléaire dans la production d'électricité. C'est pour répondre à cette question que nous avons créé le groupe de réflexion sur l'énergie (devenu la Commission Énergie) au sein de la SFP et que nous nous mîmes en devoir de consulter de nombreux experts sur ces questions. Le livre « L'énergie dans le monde : bilan et perspectives »² fut le fruit de ces consultations. Il nous apparut que les questions de l'épuisement des réserves fossiles et de la réduction des émissions de CO₂ ne pourraient pas trouver de solution satisfaisante sans l'apport du nucléaire. À moyen terme, les réacteurs surgénérateurs nous apparurent incontournables.

J'espère que cette introduction personnelle permettra au lecteur de comprendre mes motivations et d'admettre que c'est un raisonnement honnête et sincère qui m'a conduit à faire un choix pour trouver un bon compromis entre les contraintes que sont la perspective d'un changement climatique dommageable, celle de l'épuisement des réserves fossiles, la pénurie énergétique dont souffriront surtout les moins favorisés et les risques du nucléaire. Je n'ai certes pas l'ambition de convaincre tous les lecteurs que ma conclusion est la seule valable, mais j'espère que l'examen de ces « questions sur le nucléaire » lui permettra d'enrichir sa propre démarche et de lui faire peser le pour et le contre du recours à l'énergie nucléaire civile en connaissance de cause.

1. Voir *Les déchets Nucléaires*, dirigé par René Turlay, chez EDP Sciences.

2. *L'énergie dans le monde : bilan et perspectives*, J. L. Bobin, H. Nifenecker, C. Stéphan, chez EDP Sciences.

Vj k'ŕ ci g'kpvqpcn' 'h'v'dŕpm

La France est-elle le pays le plus avancé dans le nucléaire ?

(Il ne faut pas prendre ses poux pour des gazelles – proverbe arabe)

La France tire près de 80 % de son électricité de *réacteurs*^{*1} nucléaires. C'est un record mondial. Ses 59 réacteurs en fonctionnement mettent la France au deuxième rang, derrière les États-Unis (103) et devant le Japon (55) et la Russie (31). En 2006, au plan mondial, la production d'électricité par les centrales nucléaires atteignait 2 800 TWh et 420 pour la France. Est-ce que cela signifie que la France est le pays le plus avancé dans le domaine du nucléaire ? Pour répondre à cette question il faut examiner tous les aspects de cette industrie².

La France contrôle l'ensemble du cycle nucléaire

L'extraction et le traitement du minerai d'uranium

La production mondiale d'uranium dépasse 40 000 tonnes par an. *Areva*^{*} en extrait 6 000, soit 15 %. Les entreprises qui dépassent la production d'Areva sont des entreprises minières et ne contrôlent que la partie minière du cycle de l'uranium.

1. Les termes en italiques et marqués d'un astérisque sont définis dans le glossaire.

2. Les données de ce chapitre peuvent être trouvées sur le site de la World Nuclear Association : <http://www.world-nuclear.org>.

Après concassage et broyage du minerai, l'uranium en est extrait par réactions chimiques (acide ou basique) dans une solution aqueuse. La solution uranifère, avec un taux de récupération d'uranium supérieur à 90 %, est ensuite traitée par précipitation ou extraction sur des résines échangeuses d'ions afin de purifier et de concentrer l'uranium. Ce concentré est alors précipité sous forme d'uranate qui constitue finalement le « yellow-cake » titrant entre 65 et 70 % en masse d'uranium métal. Cet aggloméré de poudre, chimiquement très stable, est finalement mis en conteneurs aisément transportables. Le tableau 1.1 permet de situer la place d'Areva parmi les principaux acteurs de l'extraction de minerai d'uranium.

TABLEAU 1.1 Principales sociétés intervenant sur le marché de l'uranium.

Compagnie	Caractéristique	Pays	Uranium extrait (tonnes en 2007)	Part (%)
Cameco	minière	Canada	7 770	19
Rio Tinto	minière	UK-Australie	7 172	17
Areva	intégrée	France	6 046	15
KazAtomProm	minière	Kazakhstan	4 795	12
ARMZ	intégrée (Rosatom)	Russie	3 413	8
BHP Billiton	minière	UK-Australie	3 388	8
Navoi	minière	Ouzbékistan	2 320	6
Autres			6 376	16
Total			41 279	

Areva exploite des mines, soit seule, soit en coopération principalement au Canada (44 %), au Niger (35 %), au Kazakhstan (21 %). Elle a des projets dans de nombreux pays, particulièrement en Australie, en Mongolie, en Namibie et en Russie.

L'enrichissement en uranium 235

Les « yellow-cake » produits sur les cinq continents sont dirigés vers les quelques usines de raffinage et de conversion existantes dans le monde : États-Unis, Grande-Bretagne, Russie ainsi qu'en France dans les usines Comurhex de Malvési et de Pierrelatte. Ces usines fournissent un composé, l'UF₆ qui a le mérite de se présenter sous forme solide à température et pression ambiantes et de se gazéifier à température modérée. Cette forme gazeuse des trois isotopes* 234UF₆, 235UF₆ et 238UF₆ est particulièrement bien adaptée aux opérations de séparation pour obtenir l'enrichissement en isotope 235 de l'uranium. La composition de l'uranium naturel est de 99,28 % d'uranium 238, 0,71 % d'uranium 235 et 0,0054 % d'uranium 234. L'uranium 235 est le seul isotope dit fissile (pour des neutrons* lents) et le combustible des réacteurs refroidis à l'eau légère (celle qui nous est fournie par nos robinets) nécessite un enrichissement en uranium 235 variable entre 3 et 5 % environ. Indépendamment de la technique utilisée, la consommation d'énergie dépend du

degré d'enrichissement en uranium 235 et du degré d'appauvrissement de l'uranium résiduel. Cette dépendance s'exprime en unité de travail de séparation (UTS). Par exemple, pour séparer 1 kg d'uranium naturel en uranium enrichi en 235 à 3,5 % et pour un uranium appauvri à 0,2 % il faut environ 3 UTS, et on obtient 155 g d'uranium enrichi. Notons que la quantité d'uranium 235 présente dans l'uranium naturel est de 7,1 g, celle présente dans l'uranium enrichi de 5,5 g et celle encore présente dans l'uranium appauvri de 1,6 g.

Un réacteur produisant une puissance électrique de 1 gigawatt (1 GWe) consomme environ 30 tonnes par an de combustible enrichi à 3,5 %, issu du traitement de 200 tonnes d'uranium naturel. Les besoins annuels en enrichissement pour un tel réacteur sont donc d'environ 90 000 UTS.

Les 436 réacteurs en fonctionnement dans le monde ont une puissance de 372 GWe et requièrent donc environ 35 millions d'UTS.

Il existe deux techniques industrielles d'enrichissement de l'uranium : la diffusion gazeuse et la centrifugation gazeuse. L'opération d'enrichissement exige de l'énergie dont la quantité est proportionnelle au nombre d'UTS, mais dépend aussi de la technique utilisée, la centrifugation en consommant environ 50 fois moins que la diffusion gazeuse.

Le principe de la diffusion gazeuse s'appuie sur le fait que la diffusion des molécules de gaz à travers une paroi poreuse est d'autant plus rapide que la masse de ces molécules est faible. Cette technique a été mise au point aux États-Unis dans le cadre du projet Manhattan. Elle a ensuite été utilisée en Grande-Bretagne, en France et en Chine. On fait passer l' UF_6 qui est un gaz à 56 °C à travers une multitude de parois poreuses (dont les porosités sont inférieures à 0,2 μm) à la sortie desquelles l' UF_6 s'enrichit petit à petit en ^{235}U (qui est moins lourd que ^{238}U)¹. Pour obtenir la teneur en ^{235}U souhaitée, il faut renouveler cette opération en utilisant des milliers de parois poreuses successives qu'on appelle étages.

Le principe de la centrifugation gazeuse consiste à injecter de l' UF_6 dans une centrifugeuse tournant à très grande vitesse. Dans cette configuration, les isotopes les plus lourds diffusent vers l'extérieur de la centrifugeuse tandis que l'uranium 235 se concentre plutôt en son centre. La première utilisation industrielle de la centrifugation a été faite en URSS². Elle a, ensuite, donné lieu à une collaboration entre l'Allemagne, les Pays-Bas et la Grande-Bretagne, débouchant sur la construction de l'usine Urenco.

1. Pour une température donnée, la vitesse d'agitation des molécules est d'autant plus grande que leur masse est faible. C'est cette faible différence de vitesse entre les molécules de $^{235}\text{UF}_6$ et de $^{238}\text{UF}_6$ qui est mise à profit dans les usines de séparation isotopique à diffusion gazeuse.

2. C'est le chercheur autrichien, Gernot Zippe qui, avant la Seconde Guerre mondiale, avait inventé une centrifugeuse associant une séparation par centrifugation dans un plan horizontal à un mouvement vertical de convection thermique. Fait prisonnier par les Russes à la fin de la guerre, il leur permit de réaliser les premières « centrifugeuses Zippe » qui fournirent l'uranium très enrichi utilisé dans les bombes nucléaires russes. Il eut l'autorisation de rentrer à Vienne en 1956. Les États-Unis lui proposèrent de travailler dans un centre nucléaire secret, mais il refusa. Finalement, il fournit la technique utilisée par Urenco.

Le grand avantage de la centrifugation est sa faible consommation d'énergie. Son désavantage, nous y reviendrons, est que c'est une technique « proliférante ».

TABEAU 1.2 *Capacités d'enrichissement dans le monde (en milliers d'UTS).*

	2006	2015
France – Areva	10 800*	7 500
Allemagne-Pays-Bas-UK – Urenco	9 000	15 000
Japon – JNFL	1 050	1 500
États-Unis – USEC	8 000*	3 500+
États-Unis – Urenco	0	3 000
États-Unis – Areva	0	1 000
Russie – Tenex	25 000	33 000+
Chine – CNNC	1 000	2 000
Autres	300	300
Total	54 150	66 800+
Besoins	48 428	57 000 - 63 000

* Usines de diffusion.

Source : World Nuclear Association (WNA).

Le tableau 1.2 montre les capacités d'enrichissement dans le monde. D'ici 2015, pratiquement toutes les usines de diffusion disparaîtront. En particulier, Areva doit arrêter son usine de diffusion Georges-Besse I et la remplacer par une usine à centrifugeuse Georges-Besse II. On observe une décroissance de la capacité d'enrichissement d'Areva qui ne pourra fournir qu'environ 95 GWe. Areva est et sera distancée à la fois par Urenco et, surtout par les usines russes.

La fabrication des combustibles

L' UF_6 sortant de l'usine d'enrichissement doit être transformé en poudre d' UO_2 . Par frittage, on fabrique ensuite des pastilles qui sont elles-mêmes empilées dans des aiguilles de combustible réunies pour former les éléments combustibles. Areva fournit environ 40 % des éléments combustibles brûlés dans les réacteurs *REP** et *REB** du monde entier, grâce à ses usines en France, Belgique, Allemagne et États-Unis. Elle fournit des combustibles à environ 120 réacteurs sur 436 dans le monde.

La maintenance des réacteurs

En général, les constructeurs de réacteurs continuent d'en assurer la maintenance, ce qui leur assure un chiffre d'affaires de base.

Il faut d'abord remarquer qu'Areva a des contrats d'entretien sur une centaine de réacteurs dans le monde (les 59 réacteurs français, mais aussi les réacteurs allemands,

belges, suisses). Au plan mondial, la compétition sera vive entre Toshiba-Westinghouse qui a construit 101 réacteurs, Areva NP (qui a récupéré les réacteurs construits par Siemens) qui en a construit 86 (104 avec son allié Mitsubishi), General Electric qui en a construit 52 (62 avec son allié Hitachi) et le Russe Rosatom qui en a construit 56 et bénéficie désormais de la collaboration de Siemens. Il faudra aussi compter avec des constructeurs « nationaux » comme l'AECL du Canada (14 réacteurs du type *Candu** à eau lourde), le constructeur indien (NPCIL, 13 réacteurs) et l'helvético-suédois Asea Brown Bowery (ABB, 10 réacteurs) et, à terme, les constructeurs coréens ou chinois.

La construction de nouveaux réacteurs

On parle de renaissance du nucléaire¹ depuis l'envolée des cours du pétrole et une prise en compte croissante de la nécessité de devoir réduire les émissions de CO₂. En réalité cette renaissance n'est pas encore écrite dans le nombre de réacteurs en construction ou faisant l'objet d'un passage de commande ferme. Ainsi, Areva est engagée dans la construction de 4 *EPR**, un en Finlande, un en France (Flamanville), et 2 en Chine. Westinghouse-Toshiba dans celle de 4 AP1000 en Chine.

En Corée du Sud, 6 réacteurs de type REP sont en construction dont 4 OPR1000² de 1 000 MW et 2 APR1400 de 1 350 MW. 6 autres réacteurs de type APR1400³ sont commandés. La récente commande de 4 APR1400 par Abu Dhabi amène donc à 16 le nombre de réacteurs en construction ou commandés à la compagnie coréenne Kepco et à ses associés.

La situation de Rosatom, l'opérateur constructeur russe, semble beaucoup mieux assurée que celle de ses concurrents occidentaux. En effet, 7 réacteurs sont en phase de construction en Russie, dont 4 réacteurs à eau pressurisée (entre 1 000 et 1 200 MWe), un réacteur rapide, un *RBMK**. Et 11 réacteurs à eau pressurisée *VVER** 1200 sont planifiés pour un démarrage d'ici 2016. Par ailleurs, Rosatom construit ou doit construire des réacteurs en dehors de la Russie : 2 en Slovaquie, 2 en Bulgarie, 1 en Iran, 2 en Inde, 1 au Kazakhstan. Ajoutons que les Russes sont devenus des leaders pour les réacteurs surgénérateurs refroidis au sodium avec le lancement de la construction de leur nouveau *RNR** (BN800), et, aux dernières nouvelles, une commande de 2 BN800 par les Chinois. Ceux-ci, qui « nationalisent » les réacteurs étrangers, particulièrement les français dans des collaborations qu'ils dirigent, terminent la construction de 6 réacteurs ; 11 autres sont planifiés, en addition aux 6 réacteurs de génération III⁴ en cours de construction par Westinghouse (4) et Areva (2).

1. Le désastre industriel de la centrale de Fukushima peut d'ailleurs mettre en cause cette renaissance.

2. *Optimized Pressurized Reactor*.

3. *Advanced Pressurized Reactor*.

4. On distingue actuellement quatre générations de réacteurs. La première est constituée par ceux construits essentiellement pour fabriquer le plutonium nécessaire à la fabrication des armes nucléaires. Il s'agit, par exemple des réacteurs graphite-gaz français et anglais, producteurs d'électricité mais fonctionnant avec de l'uranium naturel et inspirés directement par les réacteurs dits plutonigènes (les réacteurs G1, G2, et G3 de Marcoule, par exemple).



Remerciements

Il ne m'aurait pas été possible de mener la rédaction de ce livre à son terme sans le soutien indéfectible et patient de mon épouse, Marguerite Nifenecker.

Après plus de 45 ans de vie professionnelle, ma motivation pour poursuivre un travail sur les questions énergétiques et nucléaires concrétisées par la création de « Sauvons le Climat » et par le présent ouvrage n'a pas faibli. Cela a été possible grâce à un groupe de précieux amis, parmi lesquels Peter Armbruster, Mohammed Asghar, Pierre Bacher, Roger Balian, Monique Bernas, Sven Bjornholm, Michel Chevalier, Richard Geller, Jacques Masurel, Jean Poitou, Michael Schneeberger et Raymond Warlop. Il faut aussi que je cite ceux qui ont été à l'origine de la commission *Énergie de la Société de Physique*, Jean-Louis Bobin, Elisabeth Huffer et Claude Stéphan. Je n'aurais jamais pu acquérir quelques connaissances sur les réacteurs nucléaires sans mes collègues avec lesquels nous avons créé le groupe d'études des réacteurs du Laboratoire de Physique Corpusculaire et de Cosmologie de Grenoble, particulièrement Jean-Marie Loiseaux, Roger Brissot, Annick Billebaud, Sylvain David, Daniel Heuer, Christian Le Brun, Olivier Méplan et Alexis Nuttin. Je n'oublie pas, non plus, l'importance décisive de Carlo Rubbia dans la création de ce groupe et pour nous avoir montré que des physiciens des particules pouvaient aussi maîtriser la physique des réacteurs nucléaires.

Ce livre n'aurait pu être rédigé sans les discussions enrichissantes partagées avec Claude Acket, Bertrand Barré, Robert Dautray, Robert Guillaumont, Roland Masse, Henri Métivier, Gérard Ouzounian, Pierre Schmitt, Bernard Tamain et Georges Vendryes.

Enfin comment ne pas penser à René Joly, lui qui m'a accueilli chaleureusement et soutenu, contre vents et marées, comme jeune chercheur au Service de Métrologie Neutronique Fondamentale à Saclay. René nous a quittés cette année nous laissant en quelque sorte comme orphelins.