

Michel Chouha - Paul Reuss

Tchernobyl, 25 ans après... Fukushima
Quel avenir pour le nucléaire ?

Editions
TEC
& **DOC**

Lavoisier

**Tchernobyl, 25 ans après...
Fukushima
Quel avenir pour le nucléaire ?**

Tchernobyl, 25 ans après... Fukushima Quel avenir pour le nucléaire ?

Michel Chouha

et

Paul Reuss

Préface de Jacques Repussard



11, rue Lavoisier
75008 Paris

Chez le même éditeur

La physique des réacteurs nucléaires

S. Marguet, 2011

Toxicologie nucléaire environnementale et humaine

M.-T. Ménager, J. Garnier-Laplace, M. Goyffon, Coordonnateurs, 2009

La défense en profondeur : contribution de la sûreté nucléaire à la sécurité industrielle

E. Garbolino, 2008

Introduction à l'analyse probabiliste des risques industriels

H. Procaccia, 2008

Les isotopes du plutonium et leurs descendants dans le nucléaire civil

(Rapport à l'Académie des Sciences)

Y. Dautray, 2005

Le risque nucléaire

H. de Choudens, 2001

L'énergie nucléaire civile dans le cadre temporel des changements climatiques

(Rapport à l'Académie des Sciences)

R. Dautray, 2001

Matériaux du nucléaire

Académie des Sciences, 2000

Manuel pratique de radioprotection

D.-J. Gambini, R. Granier, G. Boisserie, 1997

Radioprotection dans les installations nucléaires

H. de Choudens, G. Troesch, 1997



© LAVOISIER, 2011

ISBN : 978-2-7430-1364-6

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1^{er} juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code pénal art. 425).

Préface

Tout au long du vingtième siècle, le développement prodigieux des technologies nucléaires a été rythmé par la succession rapide des découvertes, et des solutions pour les mettre en œuvre dans la pratique, qu'il s'agisse d'applications médicales, industrielles, énergétiques, ou militaires. La physique nucléaire a aussi accompagné l'essor de nombreuses autres sciences, aussi diverses que l'astrophysique, la biologie, ou l'histoire en mettant à leur disposition de nouvelles techniques d'observation, très performantes, du monde qui nous entoure.

Malgré la constatation, assez tôt, de l'existence de risques pour la santé liés à la manipulation de certains éléments radioactifs, la foi dans la capacité de progrès engendrée par ces nouvelles techniques a longtemps été la plus forte, attirant en grand nombre les chercheurs et ingénieurs vers les laboratoires et organismes mettant en œuvre ces technologies prometteuses, auxquelles les politiques nationales accordaient une grande priorité, dans un monde assoiffé d'énergie.

Et puis, après qu'un questionnement soit progressivement apparu dans les opinions publiques, en Europe surtout, au sujet du bien fondé des applications militaires, l'impensable s'est produit : en l'espace de quelques années, deux réacteurs électronucléaires, aux États-Unis puis en URSS, ont connu un accident destructeur dont les ingénieurs avaient pronostiqué, à tort, que s'il était théoriquement envisageable, sa survenue était en pratique impossible. Avec pour le second accident, à Tchernobyl, des conséquences environnementales et humaines gravissimes qui en ont fait une catastrophe à l'échelle de toute une partie du continent.

Alors que dans de nombreux pays industriels, à l'est comme à l'ouest, l'énergie électronucléaire avait été une réponse consensuelle à la première grande crise pétrolière, la priorité devenait alors celle de la gestion de risques jusqu'alors manifestement sous-estimés.

Il est devenu clair que la sûreté aussi était une affaire de science. Des efforts considérables de recherche nécessitant des investissements importants ont été

consacrés, à l'échelle internationale, pour recenser, comprendre et modéliser les phénomènes et attitudes à l'origine des risques. Ainsi que pour mieux comprendre les effets sur l'homme et l'environnement d'expositions chroniques à des pollutions radioactives.

Les organisations ont aussi été remises en cause, notamment au niveau institutionnel, pour assurer que les processus de décision prennent en compte correctement la gestion des risques, selon un principe fondamental de séparation des rôles et de garantie d'indépendance des acteurs concernés les uns vis-à-vis des autres.

En vingt ans, d'immenses progrès ont été accomplis dans le développement de ces connaissances. Pourtant, au sein des « sociétés de la connaissance » qui caractérisent aujourd'hui une majorité de nations, l'acceptation de l'énergie nucléaire reste une question sensible : la confiance ne se décrète pas, et il est donc indispensable de mettre à la disposition de tous, et le plus largement possible, les éléments d'un débat aussi pluraliste que possible.

L'histoire est l'un de ces éléments. De même que la mise en perspective des connaissances essentielles à la compréhension des problématiques de société associées à l'énergie nucléaire.

Telle est l'ambition de cet ouvrage de synthèse qui paraît à point nommé, un quart de siècle après la catastrophe de Tchernobyl, et au moment où un certain nombre de pays envisagent de renouer avec la construction de nouveaux réacteurs nucléaires, aux performances technologiques et de sûreté renforcées.

Je salue donc l'initiative de Michel Chouha et Paul Reuss qui, en relativement peu de pages écrites dans un style dont le lecteur appréciera le caractère à la fois précis et accessible, réussissent à raconter l'histoire de l'énergie nucléaire, à faire émerger les aspects essentiels du débat sur la sûreté, à décrire minute par minute l'accident survenu le 26 avril 1986, et à ouvrir le débat sur l'avenir de ces technologies, exemples à l'appui.

Jacques Repussard

Directeur Général de l'Institut
de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

Table des matières

Préface	V
Introduction	XIII

Première partie **L'homme et l'énergie**

Chapitre 1

Les besoins en énergie	3
1.1. L'évolution de la consommation individuelle d'énergie	3
1.2. L'évolution de la population mondiale	4
1.3. Les besoins mondiaux en énergie	5

Chapitre 2

Les ressources en énergie fossile	9
2.1. Le charbon	11
2.2. Le pétrole	12
2.3. Le gaz naturel	13
2.4. L'uranium	13

Chapitre 3

Les énergies renouvelables, environnement et développement durable	17
3.1. Énergie et réchauffement climatique	17
3.2. L'hydroélectricité	20

3.3. L'énergie solaire	21
3.4. L'énergie éolienne	22
3.5. La biomasse et les déchets	23
3.6. L'énergie des mers (marées, vagues, énergie thermique)	23
3.7. La géothermie	24
3.8. Le vecteur hydrogène	24
3.9. La séquestration du gaz carbonique	25
3.10. Les économies d'énergie	26
Conclusion de la première partie	27

Deuxième partie

L'énergie nucléaire

Chapitre 4

Les atomes et les éléments chimiques	31
---	-----------

Chapitre 5

Les réactions chimiques et les réactions nucléaires	39
--	-----------

Chapitre 6

La fission et la réaction en chaîne	51
--	-----------

Chapitre 7

Les réacteurs nucléaires	61
7.1. Fonctionnement des réacteurs	64
a. Criticité et cinétique des réacteurs	64
b. Effets de température	65
c. Empoisonnement par les produits de fission	67
d. Évolution du combustible	69
e. Gestion des cœurs de réacteurs	72
f. Les déchets nucléaires produits dans les réacteurs	76
7.2. Filières de réacteurs	77
a. Qu'est-ce qu'une filière de réacteur ?	77
b. Cellule et réseau d'un cœur de réacteur	78
c. La filière uranium naturel-graphite-gaz (UNGG)	79
d. La filière des réacteurs à graphite avancés (AGR)	80
e. La filière RBMK	80

f. La filière des réacteurs à graphite à haute température (HTR)	81
g. La filière CANDU	81
h. Les filières des réacteurs à eau sous pression (REP et VVER)	82
i. Les filières des réacteurs à eau bouillante (REB)	82
j. Les réacteurs à neutrons rapides	83
7.3. Les réacteurs du type REP	84
7.4. L'énergie nucléaire en France et dans le Monde	88

Chapitre 8

La sûreté nucléaire et les déchets	93
8.1. Le risque lié aux rayonnements ionisants.	94
a. Effets déterministes et effets stochastiques	94
b. Irradiation naturelle et irradiation artificielle.	95
c. Limites réglementaires	95
8.2. La sûreté nucléaire.	96
a. Le risque d'accident dans une installation nucléaire	96
b. Prévention et mitigation des accidents	98
c. Les analyses de sûreté	100
d. Le contrôle des matières nucléaires	101
8.3. La gestion des déchets nucléaires.	102
a. Classification des déchets.	102
b. Ordre de grandeur des masses des déchets nucléaires	103
c. Conditionnement et stockage des déchets	104
d. Axes de recherches et perspectives.	105
e. Le démantèlement des installations nucléaires obsolètes	106
Conclusion de la deuxième partie	114

Troisième partie

Les réacteurs de type RBMK L'accident de Tchernobyl

Chapitre 9

Les réacteurs RBMK.	117
9.1. Description générale	118
9.1.1. Le cœur.	118
9.1.2. Le combustible.	119
9.2. Fonctionnement et contrôle du réacteur.	120
9.2.1. Fonctionnement du réacteur	120
9.2.2. Contrôle du réacteur	122

9.3. Principaux circuits.	123
9.3.1. Le circuit primaire : RCS (ou MCC)	123
9.3.2. Le circuit de refroidissement de secours : ECCS	124
9.3.3. Le système de localisation des accidents : ALS	125
9.4. Avantages et inconvénients des réacteurs RBMK	126

Chapitre 10

Principaux défauts de sûreté de la conception initiale des réacteurs RBMK	129
10.1. Le coefficient de vide positif	129
10.2. Le système d'arrêt d'urgence	131
10.3. Le confinement	133

Chapitre 11

L'accident de Tchernobyl	135
11.1. Les causes de l'accident	135
11.2. Le contexte de l'accident	136
11.3. Le déroulement de l'accident	136
11.4. L'incendie et les pompiers	139
11.5. Les liquidateurs	139
11.6. Les conséquences environnementales et sanitaires	142
11.7. Le site de Tchernobyl aujourd'hui	146

Chapitre 12

Principales améliorations de sûreté des réacteurs RBMK depuis Tchernobyl	151
12.1. Mesures de sûreté post-Tchernobyl	152
12.1.1. Réduction du coefficient de vide positif	152
12.1.2. Ajout d'un système d'arrêt d'urgence rapide	153
12.1.3. Documentation d'exploitation et inspections en service	153
12.2. Les programmes de modernisation.	153
12.2.1. Physique du cœur et performance du combustible.	155
12.2.2. Nouveau système de contrôle et de protection du réacteur (IICPS)	155
12.2.3. Système de refroidissement de secours du réacteur (ECCS)	156
12.2.4. Système des alimentations électriques de secours (EPSS)	158
12.2.5. Cavité du réacteur et système de limitation de la pression	158
12.2.6. Système automatique d'aide au pilotage (Skala-Mikro).	159
12.2.7. Conclusion	160

Chapitre 13

Les réacteurs RBMK aujourd’hui et demain	163
13.1. Panorama de l’état actuel des RBMK	163
13.2. Politique russe de prolongation de la durée de vie des RBMK	165
13.2.1. Réalésage des canaux et remplacement des tubes de force	165
13.2.2. Prolongation de la durée de vie	165
13.3. Le cas du réacteur Koursk 5	166
13.4. Avenir de la filière RBMK dans le contexte actuel de renaissance nucléaire	168
Conclusion de la troisième partie	170

*Quatrième partie***La renaissance de l’énergie nucléaire***Chapitre 14*

Les atouts de l’énergie nucléaire	173
14.1. Technologie	173
14.2. Économie	174
14.3. Risques	175
14.4. Impacts sur l’environnement	177
14.5. Disponibilité en combustible	178

Chapitre 15

Perspectives de l’énergie nucléaire	181
15.1. Le contexte actuel	181
15.2. L’EPR et les réacteurs de troisième génération	183
15.3. Les réacteurs de quatrième génération	187
15.4. La fusion nucléaire contrôlée	195
Conclusion de la quatrième partie	198
Conclusion générale	199
Références bibliographiques	204
Postface	207
Index	211

Introduction

Ce petit livre s'adresse à toutes les personnes désireuses de savoir ce qu'est l'énergie nucléaire, se demandant quels sont ses atouts et s'inquiétant sans doute aussi de l'éventualité d'un accident – un nouveau Tchernobyl ? – et du devenir des déchets radioactifs.

La lecture de ce livre ne nécessite pas de connaissances préalables en physique ou en mathématiques.

Les deux premières parties, en effet, apportent les éléments indispensables : la première, *L'homme et l'énergie*, présente les besoins en énergie et les sources susceptibles d'y répondre ; la deuxième, *L'énergie nucléaire*, introduit les principes physiques des réacteurs, décrit les principales filières et la situation actuelle du parc mondial de réacteurs, et montre enfin comment est assurée la sûreté et comment sont gérés les déchets radioactifs.

La troisième partie est consacrée à *l'accident de Tchernobyl* : quelles sont les particularités des réacteurs RBMK, quels sont les défauts de leur conception initiale, que s'est-il passé le 26 avril 1986, qu'a-t-on amélioré depuis et quelles sont les perspectives de cette filière ?

Dans la dernière partie, qui conclura l'ensemble, nous tenterons d'analyser les perspectives de l'énergie nucléaire. Enfin, une postface a été rédigée à la dernière minute pour rendre compte succinctement des récents événements de Fukushima.

Au cours de ces dernières années, les perspectives apparaissaient bien plus favorables qu'au cours des décennies de dépression qui avaient suivi deux accidents majeurs : Three Mile Island et Tchernobyl. On entendait même souvent parler de « renaissance » de l'énergie nucléaire : plus de vingt réacteurs ont même été commandés, qui devraient être construits dans différents pays du monde au cours des deux prochaines décennies.

Soudain, à la suite d'une catastrophe naturelle exceptionnellement violente, des accidents en série sont venus affecter plusieurs réacteurs à la centrale de Fukushima au Japon, l'un des pays les plus avancés au monde et certainement des

mieux préparés à de pareilles circonstances. Le bilan de ces accidents n'est pas encore connu dans les détails à l'heure actuelle mais tout laisse à penser qu'il sera très lourd.

Alors, à la lumière de ces récents événements, l'enthousiasme de ces dernières années peut-il persister ? Quelles leçons nous apporte soudain Fukushima ? Peut-on continuer encore à parler de « renaissance » de l'énergie nucléaire ? Les débats sur ces questions vont très certainement s'intensifier au cours des mois et années à venir.

Apporter un éclairage sur les questions fondamentales de l'énergie nucléaire, mettre à la disposition de tous les données et les explications qui permettent de se construire une opinion propre, concourir à ce que chacun puisse prendre pleinement sa part aux débats futurs sur ces questions : tel est modestement le vœu de cet ouvrage.

Par avance, nous remercions chaleureusement toutes celles et tous ceux qui auront l'amabilité de nous enrichir de leurs observations et de leurs réflexions.

Michel Chouha et Paul Reuss

Ingénieur chercheur à l'IRSN, docteur en sciences physiques, **Michel Chouha**, a partagé sa carrière entre les études des réacteurs nucléaires, les analyses de sûreté et l'enseignement. Il a dédié plusieurs années aux réacteurs RBMK (de type Tchernobyl).

Paul Reuss, est ancien élève de l'École polytechnique et docteur ès sciences, spécialiste de la physique des réacteurs. Il a réalisé toute sa carrière au CEA, dont deux années à l'IPSN. Il a partagé ses activités professionnelles entre les développements de la neutronique et l'enseignement, notamment à l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN). Il est l'auteur de plusieurs ouvrages d'enseignement de la neutronique ou de vulgarisation sur l'énergie nucléaire.

Que s'est-il passé le 26 avril 1986 à Tchernobyl ?

Comment le réacteur N°4, dernier né de la centrale, a-t-il pu s'emballer provoquant la plus grande catastrophe de l'histoire du nucléaire civil ?

Aurait-on pu éviter cet accident ?

Quels en ont été les enseignements ?

Un quart de siècle plus tard, un accident similaire peut-il encore se reproduire ?

Et Fukushima... ?

Autour d'une analyse précise de l'accident de Tchernobyl et de ses suites, cet ouvrage offre un examen général du contexte énergétique mondial, un exposé des aspects physiques et techniques de l'énergie nucléaire, et une réflexion sur la place que cette dernière peut occuper parmi les autres sources d'énergie.

Après une revue complète, mais concise, des différentes sources d'énergie de notre monde, les aspects techniques fondamentaux de la physique des réacteurs nucléaires sont présentés en intégrant les questions relatives à la sûreté des centrales et à la gestion des déchets radioactifs.

La partie centrale du livre développe la problématique des réacteurs RBMK : les grandes lignes et les faiblesses en matière de sûreté de leur conception initiale, les causes de l'accident de Tchernobyl, son déroulement et ses conséquences et les améliorations qui ont été apportées, depuis la catastrophe, aux réacteurs de cette filière dont onze sont encore en exploitation aujourd'hui en Russie.

Enfin, la dernière partie introduit les concepts de futurs réacteurs, actuellement jugés comme étant les plus prometteurs.

Une conclusion générale esquisse des perspectives pour le contexte énergétique mondial en envisageant la place que pourrait y occuper l'énergie nucléaire avec, en clé de voûte, l'harmonie parfaite entre besoins énergétiques et sûreté. Une analyse vigoureusement confirmée par les événements tragiques survenus récemment à la centrale de Fukushima.

