



INTRO UNE INTRODUCTION À TION DUC

LE NUCLÉAIRE EXPLIQUÉ PAR DES PHYSICIENS

Bernard Bonin

Préface d'Étienne Klein



Collection « Une Introduction à »
dirigée par Michèle Leduc et Michel Le Bellac

Le nucléaire expliqué par des physiciens

Bernard Bonin

Préface de Étienne Klein



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Dans la même collection

Les atomes froids

Erwan Jahier, préface de M. Leduc

ISBN : 978-2-7598-0440-5 • 160 pages • 20 €

Le laser

Fabien Bretenaker et Nicolas Treps, préface de C. H. Townes

ISBN : 978-2-7598-0517-4 • 180 pages • 20 €

Le monde quantique

Michel Le Bellac, préface d'A. Aspect

ISBN : 978-2-7598-0443-6 • 232 pages • 25 €

Les planètes : les nôtres et les autres

Thérèse Encrenaz, préface de J. Lequeux

ISBN : 978-2-7598-0444-3 • 192 pages • 22 €

Naissance, évolution et mort des étoiles

James Lequeux

ISBN : 978-2-7598-0638-6 • 162 pages • 20 €

Mathématiques des marchés financiers

Mathieu Le Bellac et Arnaud Viricel, préface de J.-P. Bouchaud

ISBN : 978-2-7598-0690-4 • 200 pages • 21 €

Retrouvez tous nos ouvrages et nos collections sur

<http://www.edition-sciences.com>

Imprimé en France.

© 2012, **EDP Sciences**, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtaboeuf,
91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. 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 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 courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN 978-2-7598-0671-3



Docteur en sciences physiques, Bernard Bonin mène de 1979 à 1990, des recherches en physique nucléaire au CEA (Saclay), puis s'oriente vers la physique des accélérateurs et la physique des surfaces. De 1996 à 2000 il dirige un service de recherches et d'études sur les déchets nucléaires à l'Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire. En 2000, il devient adjoint au Directeur de la Recherche et du Développement à la COGEMA, intégré depuis au groupe AREVA. Il est actuellement Directeur Scientifique adjoint du pôle énergie nucléaire du CEA. Il est aussi professeur à l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires, et membre du comité scientifique de plusieurs instituts de recherche. Il est auditeur de l'Institut des Hautes Études Scientifiques et Techniques, promotion Mandelbrot.

Vj k'ŕ ci g'kpvqpcmf 'igh'dncpm

Remerciements

Ce livre est dédié à la mémoire de Paul Bonche, membre fondateur du Cercle d'études sur l'énergie nucléaire et coordonnateur de la première version de ce livre.

Paul, nous espérons que tu auras reconnu et apprécié cette seconde version du livre du CESEN, *Le nucléaire expliqué par des physiciens* !

Vj k' r ci g' k p v g p v k p c m f ' i g h ' d r e p m

Table des matières

Remerciements	v
Préface	xiii
Avant-propos	xv
LES MÉCANISMES PHYSIQUES DE LA RADIOACTIVITÉ	1
1 La radioactivité	3
1.1 La formation des noyaux atomiques	3
1.2 L'histoire de l'atome, depuis l'idée jusqu'à la chose	8
1.3 La découverte de la radioactivité	10
Bibliographie	14
LA RADIOACTIVITÉ DANS L'ENVIRONNEMENT ET LE VIVANT	15
2 La radioactivité dans l'environnement	17
2.1 Mesures des rayonnements dans l'air ambiant : la douche cosmique . .	18
2.2 Un radionucléide cosmogénique : le carbone 14	18
2.3 Les radionucléides de la croûte terrestre : uranium, thorium, potassium	19
2.4 Les radionucléides de l'atmosphère : le radon	20
2.5 Migration, dilution et reconcentration des radionucléides	23
2.6 Les rayonnements artificiels et l'environnement : les nuages radioactifs des essais nucléaires militaires, et des accidents de Tchernobyl et de Fukushima	23
2.7 Les transferts de radionucléides entre les différents compartiments de la biosphère	24
2.8 Les rayonnements artificiels et l'environnement : les rejets de centrales	26

2.9 Les rejets des usines	26
Bibliographie	28
3 Les effets des rayonnements sur le vivant	29
3.1 Comment les rayonnements ionisants atteignent le vivant	30
3.2 L'ordre de grandeur des doses reçues par le public	43
3.3 Les doses acceptables	45
3.4 La toxicité relative de quelques radioéléments	46
3.5 La radioactivité, un risque que l'on sait évaluer	49
Bibliographie	50
LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES : CONCEPTION, FILIÈRES, SÛRETÉ	51
4 Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire	53
4.1 La réaction de fission et les réactions en chaîne	54
4.2 Le principe des réacteurs nucléaires	57
4.3 Flux neutronique et modération	58
4.4 Stabilité et pilotage d'un réacteur	59
Bibliographie	64
5 Les différentes filières de réacteurs	65
5.1 Le choix des filières	65
5.2 Les réacteurs à eau sous pression (REP)	68
5.3 Les réacteurs à eau bouillante (REB)	72
5.4 Les réacteurs à eau lourde	75
5.5 Les réacteurs à neutrons rapides (RNR)	78
Bibliographie	85
6 La sûreté des réacteurs nucléaires	87
6.1 Le fonctionnement des circuits de refroidissement d'un réacteur	88
6.2 Les trois barrières	89
6.3 Les circuits auxiliaires de sauvegarde	91
6.4 Les scénarios d'accident	92
6.5 La relation homme-machine	94
6.6 La sûreté des réacteurs de troisième génération	95
6.7 Comment évaluer la sûreté des centrales nucléaires françaises ?	96
6.8 Qui contrôle le fonctionnement des centrales nucléaires ?	100
Bibliographie	101

7 Trois accidents nucléaires marquants, leurs causes et leurs conséquences : Three Mile Island, Tchernobyl, Fukushima	103
7.1 Three Mile Island (1979)	103
7.2 Tchernobyl (1986)	105
7.3 Fukushima (2011)	111
7.4 Les leçons tirées des accidents nucléaires	120
Bibliographie	121
LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE : RESSOURCES, TRAITEMENT, RECYCLAGE, DÉCHETS	123
8 Le « cycle du combustible » nucléaire	125
9 Uranium naturel, uranium enrichi	129
9.1 Extraction et conversion de l'uranium	129
9.2 Les ressources en uranium	137
Bibliographie	142
10 Le combustible nucléaire avant et après son passage en réacteur	143
10.1 L'assemblage de combustible nucléaire	143
10.2 Du combustible neuf au combustible utilisé : les transformations de la matière nucléaire en réacteur	145
Bibliographie	149
11 Le traitement-recyclage du combustible nucléaire	151
11.1 Les opérations de l'aval du cycle du combustible	151
11.2 Les flux de matière dans le cycle du combustible (exemple du parc français)	160
11.3 La gestion industrielle du cycle du combustible	162
11.4 Les transports de matières nucléaires	166
11.5 Bilan du traitement-recyclage	168
Bibliographie	168
12 La transmutation	169
12.1 L'objectif de la transmutation	169
12.2 Les éléments à transmuter en priorité	172
12.3 L'utilisation du plutonium dans les REP (le MOX)	175
12.4 Les problèmes posés par le MOX	176
Bibliographie	177

13 Les déchets nucléaires	179
13.1 Volumes et flux de déchets	179
13.2 Une stratégie et des étapes pour la gestion des déchets	181
13.3 Conditionnement des déchets : des progrès continus	183
13.4 Déchets et effluents	183
13.5 Procédés de conditionnement	184
13.6 Des conditionnements qui doivent résister à l'épreuve du temps	187
Bibliographie	189
14 Le stockage géologique des déchets nucléaires	191
14.1 Le concept du stockage	191
14.2 Le stockage profond	191
14.3 La première barrière	195
14.4 La barrière ouvragée	197
14.5 La barrière géologique	198
14.6 Les scénarios d'évolution et l'évaluation de l'impact d'un stockage	199
14.7 Perspectives pour le stockage des déchets nucléaires	204
Bibliographie	205
LE NUCLÉAIRE DANS LE PANORAMA DES ÉNERGIES	207
15 Le nucléaire dans le panorama énergétique	209
15.1 L'énergie dans le monde	212
15.2 Les réacteurs nucléaires	214
Bibliographie	216
16 L'économie du nucléaire	217
Bibliographie	220
LES OPTIONS DU FUTUR	221
17 Le nucléaire du futur. Réacteurs et cycles du combustible	223
17.1 De l'origine des espèces (de réacteurs). Filières	223
17.2 Le cycle du combustible des systèmes nucléaires du futur : quelques éléments d'orientation	228
17.3 Plusieurs options possibles pour les réacteurs à neutrons rapides	232
17.4 De nouveaux critères pour les systèmes nucléaires du futur	237
17.5 De nouvelles utilisations pour l'énergie nucléaire	240
17.6 Quelles recherches pour les systèmes nucléaires du futur ?	241

17.7 Préparer le remplacement des réacteurs actuels par des réacteurs
de 3^e puis de 4^e génération, plus efficaces et plus sûrs 243

17.8 À encore plus long terme (le siècle) : le cycle du combustible thorium 254

17.9 Un jour peut-être : la fusion 255

Glossaire-index **257**

Vj ku'r ci g'kpvgnkqpcmf 'igh'dre pm

Préface

Chacun peut observer que dans nos sociétés souvent dites « postmodernes », dès qu'il est question de sciences ou de technologies, la cacophonie règne : toutes sortes d'arguments empruntés à de multiples sources s'entremêlent, s'opposent, se radicalisent. Les objets techniques se trouvent ainsi soumis à une polarisation affective de plus en plus intense alors même qu'ils deviennent de plus en plus opaques pour les mortels communs que nous sommes tous. Tout se passe comme si, par un « effet de halo »¹, ils rayonnaient autour d'eux une lumière symbolique dépassant leur réalité propre, au point que nul d'entre nous ne peut plus prétendre qu'il les perçoit tels qu'ils sont vraiment. Difficile, dans un tel contexte, de trouver les moyens qui évitent de succomber aussi bien aux facilités de la techno-phobie qu'aux séductions de la propagande opiacée. Difficile surtout de diffuser des connaissances scientifiques, car les messages que l'on transmet ne sont pas des sortes de cours magistraux que l'on donnerait dans une salle de classe où il y aurait les bons élèves et les cancre : ce sont plutôt des armes distribuées sur une sorte de champ de bataille.

C'est sans doute la question générale du nucléaire qui, il y a plusieurs décennies, a installé ce type de situation, du fait qu'elle entremêlait l'idée d'une révolution scientifique majeure, celle d'une ressource énergétique considérable et aussi celle d'une formidable puissance de mort. Tout récemment, vingt-cinq ans après celui de Tchernobyl, l'accident de Fukushima est venu poser la question de savoir s'il faut poursuivre ou non une politique nucléaire dans le domaine de l'énergie. Le débat qui s'est ainsi ouvert est crucial. Dire qu'il n'est pas simple relève de la litote. Pour l'aborder et y participer dans de bonnes conditions, mieux vaut être au fait de ce en quoi consiste le nucléaire civil, depuis l'amont jusqu'à l'aval du cycle. D'où cet ouvrage pédagogique écrit par des physiciens, dont le seul but est d'expliquer ce que sont la radioactivité en général et la fission nucléaire en particulier, de présenter les différents types de réacteurs, actuels ou à venir, et d'éclairer certaines questions

¹ Gilbert Simondon, *l'Imagination et l'invention*, (1965-1966), Chatou, Les Éditions La Transparence, 2008, p. 234.

obligatoires qui se posent à notre génération : Que faire des déchets ? Peut-on concevoir un nucléaire plus sûr, plus sobre, plus propre ?

Lecture faite, chacun pourra ensuite se déterminer et prendre part au débat général sur l'énergie, en meilleure connaissance de cause.



Étienne KLEIN



Étienne KLEIN est directeur de recherches au CEA et docteur en philosophie des sciences. Il dirige actuellement le Laboratoire de Recherche sur les Sciences de la Matière du CEA (LARSIM). Il a publié de nombreux ouvrages aux Editions Flammarion.

Avant-propos

L'ambition de ce livre est de donner à un large public les clés pour comprendre les données et les enjeux de l'énergie nucléaire, à un moment où l'avenir de cette énergie fait l'objet d'un débat de société majeur. Or, nous constatons que les arguments du débat actuel dérivent dangereusement vers l'irrationnel. Il est indispensable de revenir à la raison et à la science.

L'esprit dans lequel le livre a été écrit est celui de l'objectivité scientifique, autant que faire se peut dans un domaine aussi controversé. Les auteurs sont des physiciens du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives. Souvent spécialistes de domaines scientifiques pointus, ils ont souhaité acquérir une vue d'ensemble sur le nucléaire, d'abord pour eux-mêmes, ensuite pour les autres quand ils ont réalisé que leur effort de compréhension pouvait être utile à un public plus large. Leur premier livre « Le nucléaire expliqué par des physiciens » ayant eu un certain succès il y a dix ans, ils en entreprennent aujourd'hui une nouvelle édition réactualisée, sous le même titre.

Pour se former une opinion sur les enjeux et les problèmes associés à l'utilisation du nucléaire, il est indispensable de connaître les phénomènes physiques sous-jacents. Au fil des chapitres, nous verrons les noyaux atomiques se former dans les étoiles, nous mesurerons dans notre environnement ceux qui sont encore radioactifs et le rayonnement qu'ils produisent, anodin ou non suivant la dose ou l'exposition. Enfin nous verrons comment l'Homme a domestiqué cette source nouvelle d'énergie, pour le meilleur et pour le pire, selon son habitude immémoriale.

En ce qui concerne le nucléaire civil et plus particulièrement la production d'électricité, l'examen des principes de fonctionnement d'un réacteur selon les diverses filières nous permettra d'aborder la question fondamentale de la sûreté : quels sont les accidents possibles, quelles en sont les conséquences et comment les éviter ? Le nucléaire civil a eu sa pierre noire : Tchernobyl, une catastrophe industrielle majeure au point que le nom même en est devenu synonyme pour beaucoup. Nous verrons les leçons qui en ont été tirées. Beaucoup reste à apprendre de l'accident japonais de Fukushima, tant pour la sûreté des réacteurs eux-mêmes que pour la sécurité des populations.

Un réacteur nucléaire n'est pas une entité isolée dans l'environnement, il fait partie d'un cycle qui l'alimente en combustible et prend en charge le combustible utilisé. De l'analyse de ce cycle ressortent deux nouvelles questions, qui ne sont d'ailleurs pas propres au nucléaire : « comment consommons-nous les ressources naturelles ? » et « que faisons-nous des déchets ? ». Ces deux questions peuvent être rassemblées dans une troisième : « peut-on rendre le nucléaire durable ? ».

Le développement du nucléaire se heurte à la question des ressources naturelles en atomes fissiles. Celles-ci sont rapidement épuisables si l'on en reste à la technologie des réacteurs actuels. À cette préoccupation répondent deux possibilités : soit la filière des réacteurs à neutrons rapides où l'on brûle non seulement l'uranium 235 mais l'uranium 238 (140 fois plus abondant dans la nature soit quelques confortables millénaires de ressources), soit le développement d'une filière au thorium dans un futur plus lointain, avec là encore quelques millénaires de ressources. Le développement industriel de ces filières constituerait de véritables ruptures technologiques.

Du côté des déchets, la problématique est double là encore : choix de retraiter ou non le combustible utilisé et devenir des déchets ultimes. Le retraitement, option choisie en France, permet d'économiser les ressources en recyclant des noyaux fissiles, tout en réduisant la radiotoxicité des déchets finaux. Cependant, la constitution de stocks de plutonium est un risque de cette approche. En ce qui concerne les déchets à vie longue, plusieurs voies de recherche sont ouvertes sans qu'aucune d'elles ne s'impose aujourd'hui : transmutation, entreposage, stockage ; aucune décision ne doit être prise avant le terme du moratoire imposé par voie législative.

Quel avenir pour le nucléaire ?

Les préoccupations croissantes liées au changement climatique donnent des atouts aux énergies qui produisent peu de gaz à effet de serre, comme les énergies renouvelables et le nucléaire. L'augmentation du prix des hydrocarbures renforce la compétitivité économique du nucléaire, malgré un surcoût probable induit par des normes de sécurité renforcées. En outre, les besoins en énergie dans le monde croissent rapidement, sous les effets conjugués de l'augmentation de la population mondiale et du développement accéléré de pays très peuplés comme le Brésil, la Chine et l'Inde. Ces pays annoncent leur intention de développer toutes les énergies, nucléaire compris.

Jusqu'en mars 2011, ces facteurs conjugués créaient des conditions favorables à une « renaissance » du nucléaire. Depuis, l'accident de Fukushima a rappelé que le nucléaire n'était pas sans risque, ce qui a contribué à raviver l'opposition au nucléaire. Malgré l'accident, de nombreux pays, dont le Royaume-Uni, ont réaffirmé leurs plans de développement de cette énergie ; plusieurs autres, dont l'Allemagne, ont annoncé au contraire leur intention de sortir du nucléaire via des importations massives d'énergie, et un recours accru au charbon et aux énergies renouvelables.

Dans ce contexte, le débat sur l'énergie en général et sur le nucléaire en particulier devient un véritable enjeu politique en Europe.

Voilà où nous en sommes en 2012. Peut-on concevoir un nucléaire plus sûr, plus sobre, plus propre ? Le paysage est extrêmement riche et varié. Allant de la simple adaptation d'équipements existants au développement de nouveaux concepts de réacteur, les idées existent : optimisation différente du spectre de neutron, nouvelles filières de combustible... Le parcours du lecteur sera parfois une simple promenade, parfois une escalade plus difficile, mais le jeu en vaut la chandelle, tant pour son information que pour mesurer l'enjeu des décisions à prendre au sujet du nucléaire dans les décennies à venir. Celles-ci seront lourdes de conséquences pour nos enfants et les générations futures : déchets maîtrisés ou à maîtriser, répercussions dramatiques ou non sur le climat (effet de serre), ressources énergétiques fossiles épuisées en quelques générations... Quel jugement nos arrière-petits-enfants porteraient-ils sur nous si nous leur laissions un monde plus difficile à vivre, avec l'une ou l'autre de nos ressources actuelles épuisée ? Devront-ils apprendre dans un manuel scolaire ce qu'étaient le pétrole, le gaz naturel ou l'uranium ? Et aussi ce qu'était le monde avant les dérèglements climatiques produits par nos rejets inconsiderés de CO₂ dans l'atmosphère ?

Le débat est crucial. Nous sommes la première génération confrontée à de tels choix, dont les répercussions dépassent les frontières d'un pays et pèseront longtemps sur nos descendants.

Qu'il s'agisse de continuer le nucléaire, d'y renoncer ou de l'amplifier, nous avons besoin pour choisir de voir loin dans l'espace et dans le temps – dans l'espace : à l'échelle planétaire, au-delà d'un provincialisme étroit ; dans le temps : à l'échelle du siècle sinon plus, de toute façon au-delà d'un mandat, électoral ou autre. Plus que jamais, à une époque où les relations entre science et société se tendent, il nous faut des décideurs éclairés et des citoyens bien informés. En alimentant le débat, les auteurs de ce livre espèrent avoir été utiles, mais soyons honnêtes : cet ouvrage ne suffira pas pour se forger une opinion de citoyen. Il faudra faire le même travail pour les autres énergies, puis comparer, mesurer à l'aune du bien commun les avantages et inconvénients de chacune, avant de donner un avis éclairé sur les énergies à développer pour notre société.

Bernard BONIN

Vj ku' r ci g' k p v g p v k q p c m { ' i g h v ' d r e p m

Première partie

Les mécanismes physiques de la radioactivité

- électricité-dessalement d'eau dans les régions du Sud : un réacteur de 200 MWe peut fournir de l'électricité pour une ville de 100 000 habitants et dessaler l'eau nécessaire à la ville (50 m³/an et par habitant, 5 kWh/m³).

Les petits réacteurs modulaires ouvrent une possibilité de leasing dans des pays émergents, surtout s'ils sont nomades : la compagnie étrangère apporte le réacteur tout construit, l'exploite avec son personnel et s'occupe de tout, y compris du cycle du combustible. Reste à savoir si cette nouvelle forme d'exploitation du nucléaire est acceptable au plan social. Jusque-là, l'exploitation nucléaire était sous le contrôle des États. La formule du leasing laisse entière la question du contrôle de sûreté. Restera-t-il du ressort des autorités locales ? N'y a-t-il pas là un nouvel exemple de colonialisme industriel ?

Les Américains voient dans les petits réacteurs modulaires la possibilité de revenir sur le marché du nucléaire, en proposant une offre innovante : enrichissement et retraitement du combustible chez eux, avec limitation des risques de prolifération et... bénéfiques financiers !

Les petits réacteurs modulaires pourraient aussi être utilisés pour des applications industrielles spécifiques. Celles-ci ne diffèrent pas par leur nature des autres applications du nucléaire citées plus haut, mais la petite taille des réacteurs facilite ces applications, car elle permet d'envisager une implantation du réacteur sur le site industriel même, qu'il s'agisse d'un champ pétrolier (extraction), une raffinerie ou une usine de transformation du charbon en hydrocarbures liquides.

Peut-on, doit-on mettre du nucléaire partout ?

Les petits réacteurs multiplient les endroits où le nucléaire pourrait s'implanter... mais multiplient aussi les endroits à contrôler, y compris dans des endroits où le contrôle est difficile.

Sous l'angle de la protection physique, et de la non-prolifération, les petits réacteurs ont des avantages et des inconvénients :

- avantages : peu de manipulations de matières radioactives sur site, d'où des risques de détournement réduits, mais :
- inconvénients : difficile d'assurer une protection civile efficace sur des sites nombreux et éloignés. Les petits réacteurs modulaires sont vulnérables face au terrorisme.

Quel avenir pour les petits réacteurs modulaires ?

L'attrait des petits réacteurs réside principalement dans l'effet de série. Pour en bénéficier, il faudrait avoir de nombreuses commandes... qui ne viendront que si la compétitivité économique est assurée. Comment amorcer la pompe ?

Autre enjeu important : les autorisations d'exploitation. À l'heure actuelle (2011), seuls les petits réacteurs à eau du type « propulsion navale » et quelques anciennes versions des réacteurs HTR ont été autorisés par les autorités de sûreté nationales. Les autres concepts n'ont même pas encore déposé de demande. Et les autorités de sûreté auront du mal à donner un avis car beaucoup de ces concepts sont très innovants.

Les petits réacteurs modulaires revêtent une importance politique particulière aux États-Unis, car c'est un créneau laissé libre par les constructeurs occidentaux (mais il existe des offres chinoises et russes dans la gamme de 200-300 MWe) et pour lequel peuvent être utilisés les moyens nationaux de production développés pour la propulsion navale.

Il y a une grosse « barrière de potentiel » à franchir avant que les communautés scientifique, industrielle, financière et politique se mobilisent conjointement pour déployer les petits réacteurs nucléaires. Mais si elles y parviennent, le nucléaire civil en sortira transformé.

7.5 Les systèmes nucléaires de quatrième génération

Le développement de la quatrième génération est engagé dès à présent, dans un cadre international et avec l'objectif d'amener ces nouveaux systèmes à maturité technique, dans la perspective d'un déploiement industriel à l'horizon 2040. Ces systèmes ont pour but de répondre aux enjeux d'une production d'énergie durable, dans une vision à long terme, et notamment de minimiser les déchets radioactifs et d'utiliser au mieux les ressources naturelles en combustible.

Ces systèmes présentent des évolutions et des innovations technologiques importantes (on peut les appeler « révolutionnaires »), qui nécessitent une vingtaine d'années de développement (Figs. 17.17, 17.18 et 17.19).

Avant de passer à une éventuelle industrialisation de ces réacteurs, il s'agira de démontrer leur sûreté et leur compétitivité économique. Cette dernière n'est pas acquise actuellement, mais ces réacteurs pourraient avoir leur heure dès le milieu du siècle dans un contexte d'énergie chère et de ressources raréfiées.

Actuellement, le plutonium des REP est recyclé sous forme de MOX.

En 2020, les REP de génération II continueront à exister, mais le Pu qu'ils produisent sera brûlé (partiellement, mais plus efficacement) par les réacteurs de génération III déployés à cette date. Les actinides mineurs produits par ce parc mixte Gen II-Gen III pourraient être séparés et entreposés.

En 2040, les premiers réacteurs de génération IV seront déployés et brûleront le Pu qui aura été mis en réserve pour leur démarrage, plus éventuellement les actinides mineurs accumulés antérieurement. Le complément en uranium nécessaire au