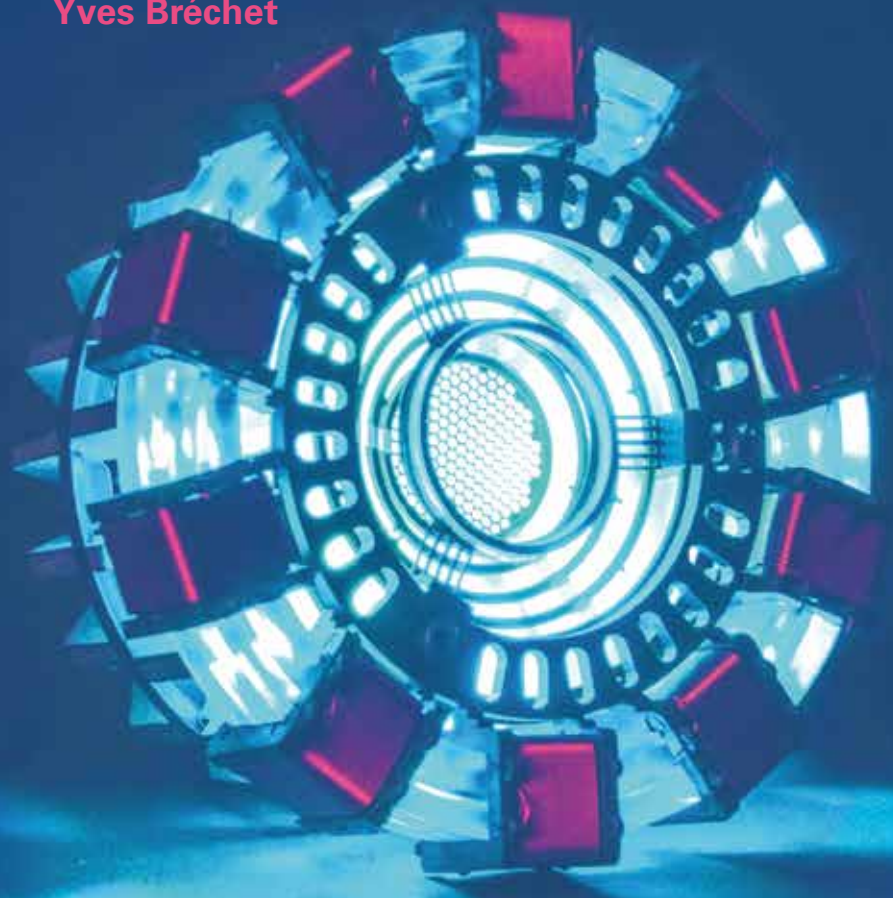
LES RÉACTEURS RAPIDES

› le nucléaire du futur

Joël GUIDEZ

Préface de
Yves Bréchet



Nos déchets nucléaires vont-ils passer à la poubelle ou fournir notre énergie pour des milliers d'années ?

edp sciences



Construction en Inde d'un reacteur rapide de 600 MWe.

Composition et mise en pages : Flexedo
Couverture : conception graphique de B. Defretin
utilisant le visuel créé par Cécile Obernesser.

Imprimé en France
ISBN (papier) : 978-2-7598-3598-0
ISBN (ebook) : 978-2-7598-3599-7

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 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.
© Joël Guidez, 2024

LES RÉACTEURS RAPIDES

le nucléaire du futur

Joël GUIDEZ

Nos déchets nucléaires vont-ils passer à la poubelle ou fournir notre énergie pour des milliers d'années ?

edp sciences

« Le pays qui développera le premier un réacteur surgénérateur aura un grand avantage compétitif dans le domaine de l'énergie atomique ».

Enrico Fermi, 1945
"Fast Reactor Development in the United States",
T. B. Cochran, H. A. Feiveson, F. Von Hippel, *Science & Global Security*, 17(2-3), 109 (2009).

Sommaire

Préface 10

Avant-propos 13

Remerciements 15

Chapitre 1

Quelle énergie pour *l'Homo sapiens* sur sa planète ?

Un peu d'histoire 18

Le réchauffement climatique 19

- Fonte des glaciers et des pôles 20
- Montée des eaux 20
- Événements climatiques exceptionnels 20
- Acidification de l'Océan 21
- Désertification et bouleversement climatique 21

Quels besoins énergétiques pour le futur ? 22

Le retour de la fée électricité ? 23

De l'énergie électrique sans production de CO_2 ? 23

Un monde alimenté par les seules énergies renouvelables ? 25

Et le bois ? 27

De nouvelles recherches pour le futur ? 27

Et le nucléaire ? 28

Le nouveau nucléaire ? 29

Conclusion 30

Chapitre 2

Nos déchets nucléaires vont-ils passer à la poubelle ou fournir notre énergie pour des milliers d'années ?

Rappel sur les fissiles et fertiles 34
Rappel sur le principe des réacteurs rapides 34
Cycle du combustible des réacteurs à eau fonctionnant sans retraitement du combustible usé (cycle ouvert) 36
Fonctionnement des réacteurs à eau avec retraitement du combustible usé (cycle avec monorecyclage du plutonium) 37
Multirecyclage en REP 39
Le chaînon manquant du nucléaire français (ou la simplification du cycle REP) 40
Rappel sur le cycle du combustible des réacteurs rapides 41
Bilan des avantages apportés par les réacteurs rapides 43
- Coût d'approvisionnement et indépendance énergétique 43
- Des réacteurs qui n'ont plus besoin d'exploitation minière et d'enrichissement de combustible 44
- Une énergie presque illimitée 44
- Une énergie dont les rejets chimiques sont nuls lors du fonctionnement des réacteurs 45
- Un fonctionnement qui minimise la dosimétrie du personnel 46
- Une énergie qui réduit la quantité finale de déchets radioactifs 46
- Une énergie qui peut réduire drastiquement la durée de dangerosité des déchets nucléaires ultimes 46

Une empreinte faible sur l'environnement 48
Conclusion 49

Chapitre 3

Les réacteurs rapides existent, je les ai rencontrés

Generation IV International Forum (GIF) 52
Les réacteurs à haute température (HTR) 53
Les réacteurs à eau supercritique (SCWR) 55
Les réacteurs rapides au gaz (GFR) 56
Les réacteurs au plomb (LFR) 58
Les réacteurs rapides à sodium (SFR) 61

Les réacteurs à sel fondu (MSR) 62
Conclusion 64

Chapitre 4

Analyse des raisons de l'échec d'implantation des réacteurs rapides dans le monde en 2024

Bilan en 2024 des réacteurs rapides dans le monde 68
Les difficultés techniques des réacteurs au plomb 70
Les difficultés techniques de la filière sodium 70
Le surcoût par rapport aux REP 72
La domination industrielle des REP 72
Des problèmes spécifiques de sûreté ? 73
La résistance à la prolifération 75
Investissements lourds 77
Existence d'usines de retraitement 77
Fabrication du combustible de réacteur rapide 78
Le cas de Superphénix 80
L'acceptation sociale 80
La perte de compétences 80
La disponibilité et le coût de l'uranium 81
Conclusion 84

Chapitre 5

Un point sur les rapides sodium (SFR) en Europe, en 2024

Introduction 88
Avantages et inconvénients du sodium 88
Le retour d'expérience des SFR 90
Un peu d'histoire : d'EFR à ESFR SMART 91
Retour au générateur de vapeur modulaire 91
Adoption d'une dalle épaisse 91
Suppression de la cuve de sécurité 92

Fixation des gros composants 92
Boucles secondaires 92
Manutention 92
Méthodologie générale du projet ESFR SMART 92
Résultats du projet ESFR SMART 93
ASTRID et le cœur d'ESFR SMART 93
Circuit primaire 94
Évacuation de la puissance résiduelle 99
Circuits secondaires 101
Disposition générale 104
Manutention 105
Bilan final des simplifications 105
Bilan final des systèmes passifs 106
Mitigation des accidents graves 106
Bilan sûreté 107
Pré-calculs et documentation 108
ESFR SIMPLE : une introduction à un SFR SMR européen 109
Déploiement 110
Conclusion 112

Chapitre 6

Les réacteurs rapides au plomb (LFR)

Historique 116
Les réacteurs au plomb dans le monde en 2024 118
Les avantages et inconvénients du plomb comme caloporteur 119
Comparaison générale avec le sodium 119
Composition isotopique 119
La chimie 120
La densité 120
Plage de températures 121
Plomb et matériaux 121
Le projet BREST 122
Le projet NEWCLEO 124

Caractéristiques générales du projet 124
Les choix technologiques de base pour le LFR-AS-200 126
Le LFR-AS-30 129
Propositions de très petits réacteurs 130
Conclusion 132

Chapitre 7

Point sur les réacteurs à sels fondus : RSF

Principe de fonctionnement des réacteurs à sels fondus 136
Les différents types de sels combustibles possibles 137
Choix du fissile 137
Choix du fertile 137
Choix du sel 138
Choix final 138
Retour d'expérience sur les réacteurs à sels fondus : le MSRE 139
Avantages potentiels des MSR rapides 141
Utilisation des déchets du cycle 141
Minimisation des déchets finaux 141
Sûreté 141
Indépendance énergétique de la France 141
Suivi de réseau, compatibilité avec les ENR 142
Coût, compétitivité économique 142
Conclusion 142
Challenges techniques 143
Chimie des sels 143
Séparation isotopique 143
Fabrication du sel combustible 144
Retraitement du sel combustible 144
Choix des matériaux 145
Neutronique et thermohydraulique 145
Gestion des gaz de fission 146
Les composants 146
L'instrumentation 147
Conclusion 148

Choix de design 148
Choix du sel intermédiaire 148
Mode de remplissage et de démarrage 149
Vidange 149
Barres de commande 149
Protection neutronique 150
Utilisation de couvertures radiales 150
Convection naturelle ou forcée du sel combustible ? 150
Conclusion 150
Approche de sûreté et licensing 151
Les projets mondiaux 152
En Russie 152
En Chine 152
Aux États-Unis et au Canada 153
Les start-up françaises 153
NAAREA 154
Stellaria 156
Conclusion 156

Conclusion
Souveraineté, durabilité, écologie et simplicité

Annexe 1 : Enseignements tirés de l'exploitation des réacteurs rapides refroidis au sodium 163
Réactions sodium/eau 163
Opérations de manutention 165
Fonctionnement des composants primaires (pompes et échangeurs) 166
Fuites et feux de sodium 166
Entrée d'air ou d'impuretés ou de gaz 167
Superphénix 167
PFR 168
BN 600 168
CEFR 168
Ruptures de gaines 168

Matériaux 169
Opérations et contrôle neutronique 170
Aérosols de sodium 171
Conclusion 171

Annexe 2 : Démonstration industrielle du cycle fermé du combustible d'un réacteur rapide refroidi au sodium 173
Expérience de retraitement du combustible Phénix 173
Données générales 173
Bilan du retour d'expérience sur les techniques de retraitement 174
Démantèlement des assemblages 174
Cisaillage des aiguilles 174
Dissolution du combustible 174
Clarification 174
Cycles d'extraction 175
Déchets 175
Conclusion sur le retraitement 175
Retour d'expérience sur la fabrication du combustible 176
Applications pour les réacteurs du futur 176

Annexe 3 : Comparaison des quatre types de combustible possibles pour les réacteurs rapides à métal liquide : sodium ou plomb 177
Introduction 177
Le combustible oxyde 179
Le combustible métallique 182
Le combustible carbure 186
Le combustible nitrure 188
Combustible/fabrication 190
Combustible/retraitement 190
Un choix du combustible suivant les applications et la stratégie ? 193
Conclusion 194

Annexe 4 : Point sur les matériaux pour un réacteur rapide au plomb 195
Méthode de protection par contrôle de la teneur en oxygène (pour les alliages conventionnels) 196

Matériaux enrichis au silicium 198
Protection par revêtement d'alumine (coating) 198
Utilisation d'un matériau enrichi à l'aluminium 198
Matériaux innovants (SiC) 199

Annexe 5 : Présentation du projet de prototype de réacteur au plomb de NEWCLEO, le LFR-AS-30 201
Conditions de fonctionnement 202
Conception de la cuve du réacteur et des internes 202
Le cœur 203
Ensemble générateur de vapeur (GV) et pompe de circulation 206
Barres de contrôle et système d'arrêt du réacteur 208
Coefficients de contre-réaction 209
L'évacuation de la puissance résiduelle 209
Analyse de sûreté 210

Annexe 6 : Le retour d'expérience des réacteurs à sels fondus : le MSRE 211
Historique des réacteurs à sels fondus 211
Présentation générale du MSRE 212
Choix du sel (FLiBe) 213
Les matériaux 213
Neutronique et écoulements au primaire 213
Pompe du sel combustible 215
Extraction de chaleur 216
Extraction des gaz de fission 217
Cycle du combustible 217
Retraitement du sel 217
Bilan final 218
Limites du retour d'expérience du MSRE 219

Annexe 7 : Quel sel combustible pour un réacteur rapide à sels fondus ? 221
Introduction 221
Éléments fissiles et fertiles 221

Éléments fissiles ... 221
Disponibilité et qualité du plutonium ... 222
Éléments fertiles ... 222
L'option couverture fertile ... 223
Conclusion ... 224
Gammes de choix du sel ... 224
Paramètres de choix ... 224
Les deux grandes familles ... 225
Température de fonctionnement et solubilité U/Pu pour les fluorures ... 226
En conclusion sur la solubilité dans les sels fluorures ... 228
Températures de fonctionnement et de solubilité U/Pu pour les chlorures ... 228
Retraitement des chlorures et des fluorures ... 230
Adaptation aux installations nucléaires françaises existantes ... 230
Situation en 2024 ... 230
Conséquences en termes de stratégie possible à court terme ... 231
Utilisation des actinides mineurs ... 231
Stratégie à long terme ... 231
Conclusion ... 232

Du même auteur ... 234

Préface



La prise de conscience du réchauffement climatique et de sa nature anthropogène, et de ses conséquences, et la nécessité subséquente de décarboner nos économies par une électrification massive, ont conduit à reconsidérer l'avantage de l'énergie nucléaire comme source d'électricité décarbonée.

Trois décennies de désinformation massive sur le nucléaire (sur ses dangers réels ou fantasmés, sur le problème des déchets, sur la prétendue impossibilité du démantèlement des centrales) dont il faudra un jour écrire l'histoire et tracer les causes. Trois décennies de « nucléaire honteux » jusque chez ceux-là mêmes qui avaient à le mettre en œuvre, nous ont amené à la situation actuelle : une industrie indispensable pour notre économie, à reconstruire faute de l'avoir entretenue, victime de la conjonction d'une désindustrialisation du pays, et d'une écologie politique purement idéologique.

Le nucléaire apparait enfin pour ce qu'il est : une énergie pilotable, faiblement consommatrice de matière et d'espace, faiblement émettrice en CO_2, à faible létalité, et qui peut assurer une stabilité des réseaux mise à mal par la pénétration massive des énergies renouvelables intermittentes, une énergie souveraine pour laquelle nous n'avons pas à importer de Chine ou d'ailleurs les moyens de production.

L'énergie nucléaire est donc à nouveau à l'ordre du jour… Mais les mauvaises idées ont la vie dure. S'il est devenu anachronique de refuser une énergie à faible émission de CO_2, si les derniers idéologues qui la rejettent encore poussent l'inconséquence en encensant le GIEC sur le réchauffement climatique sans en accepter les conclusions sur les sources d'énergie, si leur discours ressemble de plus en plus à celui d'un locataire dans une maison en flammes qui se refuserait à utiliser un extincteur sous prétexte qu'il n'est pas peint en vert, il n'en reste pas moins vrai que nombre de nos dirigeants, rétifs à admettre qu'ils se sont trompés, et toujours prompts à se donner des objectifs sans se demander s'ils sont atteignables, persistent à croire ou à laisser croire que l'énergie nucléaire est une solution transitoire.

Contraints par la réalité des choses, par l'incapacité actuelle à disposer de moyens de stockage suffisants pour gérer l'intermittence des ENR, ils sont passés d'une conception

du nucléaire comme un « mal absolu » vers celle d'un « mal nécessaire ». Et bien sûr, outre l'avantage non négligeable de conforter ces petits maîtres imperméables au doute dans la conviction d'avoir raison *in fine*, cette conception du nucléaire les dispense de penser le long terme rationnellement, et notamment en termes de ressources. Elle les dispense de reconnaitre « l'éléphant dans le couloir » : si le nucléaire augmente de 2 % par an, avec les réserves actuelles d'uranium, le marché sera en tension à partir des années 2050. En tension, dans un langage de banquier ou de chef comptable, signifie qu'il sera plus cher. Dans un langage de géopoliticien, cela signifie qu'il pourrait ne plus être disponible : si les seules ressources sont au Niger, au Kazakhstan, en Australie et au Canada, il faut être bien naïf pour croire que la France et même l'Europe feront le poids face aux États-Unis et à la Chine pour sécuriser les ressources nécessaires. D'où il sort comme une évidence que le nucléaire ne sera une solution durable et souveraine que si l'on se rend progressivement indépendant de la mine.

Or il se trouve que la solution à cette épineuse question de la ressource, et qui limite en même temps la production de déchets, existe et qu'elle existe depuis longtemps : il s'agit des réacteurs à neutrons rapides, imaginés par Fermi, et mis en œuvre en France dans les projets Phenix, Superphenix, et Astrid. Nous avions une avance considérable et reconnue de par le monde dans ces technologies, et cette avance a été méthodiquement sabordée par des irresponsables qui en ont fait une monnaie d'échange d'arrangements politiques, ou une affaire de chefs comptables. Ceux-là méritent certainement d'entrer dans l'histoire à la place qui leur revient et qui n'est pas enviable. Les antinucléaires avaient compris mieux que les autres l'importance de cette filière sans laquelle on manquera de ressources, et l'on accumulera les déchets. Bill Gates lui aussi l'a compris, et, conscient du développement nécessaire du nucléaire, il est aussi conscient de la nécessité de développer une filière rapide (Terrapower) qui s'appuie sur les acquis de l'expérience française.

C'est cette filière, les neutrons rapides, qui est le sujet de ce livre. Joël Guidez est certainement un des auteurs les mieux qualifiés pour analyser les atouts et les difficultés de cette solution. Ayant dirigé le réacteur Phenix, il a ensuite écrit un livre sur le retour d'expérience de ce réacteur. Puis il a dirigé, à ma demande en tant que Haut-Commissaire à l'Énergie atomique, un ouvrage collectif sur le retour d'expérience du réacteur Superphénix. C'est donc un ingénieur qui écrit ce livre et un ingénieur ne se paye pas de mots, il n'imagine pas que se cacher les problèmes suffit pour les résoudre, il ne rêve pas que l'avenir se construit plus facilement quand on rejette l'expérience du passé, il sait la différence entre un réacteur de papier (dont on nous abreuve sans vergogne ces temps-ci, plus efficace à pomper les subventions qu'à produire des électrons), et un réacteur « réel ». Un ingénieur ne confond pas les solutions arrivées à maturité et celles qui nécessitent des travaux pour pouvoir être construites. Un ingénieur dans le domaine du nucléaire se doit de ne jamais oublier les recommandations de l'amiral Rickover, distinguant avec humour le réacteur académique idyllique et le réacteur industriel laborieux. Il sait les difficultés dans le choix des matériaux, dans les problèmes de corrosion, dans la mise en œuvre, difficultés qui valent bien celles de la neutronique et

de la thermohydraulique. La physique ne se décrète pas dans un discours, elle se travaille et s'apprivoise. Joël Guidez nous présente les différentes options avec leurs différents degrés de maturité, les évolutions possibles, les difficultés prévisibles. Il démonte avec précision les fausses options comme le multirecyclage en réacteur à eau pressurisée « solution » dont la seule vertu est de s'absoudre des erreurs faites, au prix de la destruction d'une ressource précieuse, le plutonium. Le poids de ces difficultés, la valeur de ces innovations, se discutent, mais elles se discutent un « crayon à la main », pas dans des discussions de courtisans, pas devant les caméras ou dans un discours aussi flamboyant soit-il.

Le nucléaire est une solution souveraine et durable, pour peu que nos dirigeants, aient le courage de reconnaitre leurs erreurs passées et que l'état prenne à sa charge le développement d'une filière indispensable au pays : c'est à cela qu'on reconnait un homme d'État, à sa capacité de penser le temps long non comme un rêve, mais comme le résultat d'une stratégie rationnelle.

Je recommande vivement la lecture de ce livre, non comme celle d'une « bible », mais comme un ouvrage aidant à réfléchir sur une filière qui, depuis les années 1970, avait été pensée comme la clé de voute de la filière électronucléaire française. Et je ne pense pas faire offense à son auteur en citant, avec Georges Vendryes, le père des neutrons rapides en France, Sénèque : « il viendra un temps ou nos descendants s'étonneront que nous ayons ignoré de telles évidences ».

Yves Bréchet,
ancien Haut-commissaire à l'énergie atomique,
membre de l'Académie des sciences



Avant-propos



Quand on écrit un livre, il faut savoir pourquoi et pour qui !

Le « Pourquoi » est clair.

C'est en 1973 que j'ai commencé à travailler sur les réacteurs rapides. Phénix venait de démarrer son fonctionnement et nous étions en train de concevoir puis de construire le réacteur Superphénix. J'ai assisté au sabordage politique de Superphénix en 1997. Puis j'ai dirigé le réacteur Phénix pendant les cinq dernières années de son fonctionnement avant son arrêt définitif en 2009. Mes deux livres sur les retours d'expérience de ces deux réacteurs visaient alors à préserver une part de l'avance technique mondiale que nous avions à cette époque dans le domaine, et que nous avons totalement perdue aujourd'hui.

Mais récemment, après cette politique d'abandon qui a duré des années, il y a eu un retour net de soutien politique pour l'énergie nucléaire. Dans ce contexte, il m'a semblé utile de publier un livre, résolument tourné vers l'avenir, qui tente de réexpliquer l'intérêt de ces réacteurs rapides pour le futur de l'humanité. En 2021, les éditions américaines Elsevier m'ont proposé un contrat pour rédiger un livre en langue anglaise sur ce sujet, intitulé *Fast reactors. A solution to fight against global warming*. Ce livre édité en septembre 2022 a été essentiellement diffusé dans les pays anglo-saxons et dans le cadre du Forum international sur les réacteurs du futur.

Le but de ce nouveau livre est donc de faire une publication en français, tout en actualisant les données et connaissances sur les réacteurs rapides en 2024. Ceci introduit la question du « Pour qui ce livre ? »

Le « Pour qui » est plus complexe.

Le premier lectorat visé est l'ensemble des personnes travaillant sur le sujet. Aux acteurs historiques : CEA, EDF, Framatome… se sont ajoutés récemment de nouveaux acteurs avec la montée en puissance de plusieurs start-up travaillant sur ces réacteurs rapides, où de jeunes ingénieur(e)s s'investissent à nouveau dans l'avenir du nucléaire

en France. Cet ouvrage pourra donner à cette nouvelle génération et à l'ensemble des acteurs, des bases techniques sur les réacteurs rapides permettant de conforter leur démarche et d'y retrouver les principales références nécessaires.

Mais je voudrais aussi par ce livre apporter une contribution au choix de nos décideurs, les hommes et les femmes politiques de notre pays, soutenir le travail d'information des médias et m'adresser aux citoyens intéressés par la transition écologique. Pour cela j'ai choisi de reporter en annexes les éléments techniques les plus spécifiques, de supprimer du texte les acronymes et de proposer à l'entrée de chaque chapitre un résumé lisible par l'honnête homme (ou honnête femme !) de Montaigne.

Je suis convaincu que l'énergie est nécessaire au développement de l'humanité, que le réchauffement climatique nous impose l'arrêt des énergies fossiles et que le nucléaire doit prendre sa part dans le remplacement de ces énergies polluantes et destructives. Or le nucléaire actuel ne peut pas assurer ce rôle à long terme, comme nous le rappellerons dans ce livre. Il faut donc inlassablement rappeler l'intérêt des réacteurs rapides qui seuls peuvent fournir une énergie durable, quasi illimitée, tout en participant à la préservation de l'environnement et à la lutte contre le réchauffement climatique.

Comment les générations futures pourraient-elles nous pardonner d'avoir négligé une technique connue et opérationnelle permettant de leur fournir de l'énergie pendant des milliers d'années, une énergie ne produisant pas de CO_2, tout en n'utilisant que nos déchets nucléaires déjà disponibles ?

Joël Guidez



Remerciements

Un expert n'habite pas en ermite en haut de la montagne. Il fait partie d'une communauté scientifique aux talents divers. J'ai donc sollicité ces talents pour des aides ou relectures de différentes parties de ce livre. Ces relectures ont corrigé, conforté, ajouté des références. Bref, donné à ce livre la validation scientifique nécessaire finale. Je voudrais ici les remercier.

Patrick Mariteau. Patrick était mon adjoint à Phénix. Il est ensuite reparti vers EDF. Il a été sur le chantier EPR chinois, puis sur le chantier EPR en Finlande. Puis à Hinckley Point. Il est récemment revenu sur les rapides, car embauché à Newcleo. Patrick a relu les sept chapitres un par un, avec sa rigueur habituelle. Il a corrigé, proposé et enrichi. Grand merci pour ce travail de grande compétence et de longue haleine.

Yves Bréchet. Yves a été haut-commissaire au CEA et j'ai travaillé avec lui plusieurs années. Il a fait beaucoup d'autres choses (voir le site Wikipédia!). Il a très gentiment accepté de me faire la préface de ce livre comme il avait fait celle de mon livre sur Superphénix.

Luciano Cinotti. Luciano a un lourd passé sur les rapides. Après avoir travaillé sur divers projets (PEC, PIUS, PRISM…), il va travailler pour la conception et l'opération de Superphénix, puis sur le design du projet EFR. Après l'arrêt de Superphénix, il bascule sur les réacteurs rapides au plomb. Il a été longtemps chairman du LFR Steering Committee du GIF et a travaillé sur de nombreux projets européens. En 2021, il est co-fondateur de Newcleo, où il est actuellement la cheville ouvrière de l'équipe technique du projet. Il m'a très gentiment fourni pendant les vacances de Noël, un paquet de documentation sur le projet lui-même. Ces documentations ont été la base du chapitre et des deux annexes relatives aux réacteurs au plomb, dont il a assuré aussi une relecture ultérieure précise. Grand merci.

Hartmut Lauer. Hartmut, ancien dirigeant d'une grande entreprise électrique allemande utilisant le nucléaire, est venu prendre sa retraite à Montpellier. On trouvera dans le chapitre 1 les références de son site, qui suit de manière rigoureuse et détaillée, l'évolution des conséquences pour l'Allemagne de sa sortie du nucléaire.

Caroline Dauchez et **Brigitte Bossavy**. Elles ont assuré avec moi un atelier d'écriture d'où sont sortis les textes de la page de couverture et des pages intermédiaires avant chaque chapitre.

Laure Martinelli. Laure est une spécialiste reconnue des matériaux au CEA. Elle a relu, corrigé et enrichi avec de nombreuses références, l'annexe relative aux matériaux pour les réacteurs au plomb.

Patrick Jacquot. Patrick, retraité du CEA et embauché par Newcleo, a relu et corrigé plusieurs chapitres et annexes. Merci de cette aide précieuse, et de son amitié.

Cécile Obernesser. Cécile est une graphiste remarquable. C'est elle qui a conçu le visuel de la page de couverture et les pages intermédiaires avant les chapitres.

Daniel Heuer. Daniel, du CNRS, est certainement l'expert le plus connu et le plus compétent en France dans le domaine des réacteurs à sels fondus. J'avais beaucoup travaillé avec lui en 2018 lors de l'organisation des Journées de Massy. Il a relu, corrigé et enrichi le chapitre 7 relatif aux réacteurs à sels fondus.

Timothee Kooyman. Après avoir travaillé sur les réacteurs rapides au sodium, Timothee a basculé sur les réacteurs à sels fondus. Il est actuellement directeur technique et chef de projet chez Naarea. Il a relu et enrichi le chapitre 7 sur les réacteurs à sels fondus.

Yannick Gorsse. Yannick travaille au CEA. Il avait approfondi le retour d'expérience du MSRE en en faisant une présentation lors des Journées de Massy. C'est donc tout naturellement qu'il a relu et enrichi l'annexe 6 correspondante.

Michel Allibert. Michel, ancien du CNRS, est un chimiste reconnu dans le domaine des sels. C'est donc lui qui a relu, validé et commenté l'annexe 7 relative au choix du sel combustible.

Deux livres traitant des rapides ont aussi été édités cette année :

- le livre de Jean-Luc Alexandre, *Le Nucléaire, nouvelle génération – L'énergie qui réconcilie croissance et environnement,* Hermann, 979-1-0370-3305-5 (2024) ;
- et celui de Claire Kerboul, *L'urgence du nucléaire durable,* De Boeck Sup, 978-2-8073-5748-8 (2023).

J'y ai fait un certain nombre d'emprunts et je les en remercie.

En espérant n'avoir oublié personne dans ce passionnant travail collectif.

Joël Guidez

Chapitre 1

Quelle énergie pour *l'Homo sapiens* sur sa planète ?

Résumé

Après un rappel historique de l'évolution des besoins énergétiques de l'humanité, on explique les principales conséquences de l'utilisation récente et massive des énergies fossiles, c'est-à-dire un réchauffement climatique global sur la planète, lié à l'émission de CO_2. Quelques conséquences du réchauffement climatique en cours sont rappelées comme la montée des eaux, la fonte des banquises, le changement du climat, la désertification, l'acidification des océans, l'augmentation des événements climatiques extrêmes, etc. Ces conséquences sont annoncées à court terme.

Il est donc urgent de diminuer les utilisations d'énergies fossiles. Or celles-ci assurent aujourd'hui environ 85 % de l'énergie primaire mondiale. Par ailleurs, toutes les études prospectives montrent que, malgré les efforts d'économie d'énergie, la consommation énergétique va continuer à croître à cause de plusieurs facteurs : augmentation de la population, rattrapage économique des pays pauvres et nouveaux besoins liés au numérique ou aux nouvelles technologies (voitures électriques, hydrogène, etc.).

Les seules possibilités actuelles et opérationnelles de remplacement de ces énergies fossiles par des énergies ne produisant pas de CO_2 sont le nucléaire et les énergies renouvelables : essentiellement solaire, éolien et hydraulique. De nombreuses recherches en cours sont évoquées comme la fusion, la géothermie, le captage du CO_2, l'utilisation des marées… Mais ces énergies ne sont pas aujourd'hui opérationnelles, ne le seront peut-être jamais et ne permettent donc pas de développer la réponse nécessaire à court terme.

Les limites des énergies renouvelables sont rappelées. En particulier, le solaire et l'éolien sont des énergies intermittentes. Comme on ne sait pas stocker de grandes quantités d'électricité, ils ne peuvent donc pas assurer à eux seuls les besoins électriques d'un réseau. De plus, ce sont des énergies diffuses qui demandent donc de grandes surfaces, ce qui pose d'autres problèmes écologiques et d'acceptation du public. Seul le nucléaire permet d'assurer le complément indispensable et décarboné à ces énergies renouvelables. L'exemple de l'Allemagne est donné, qui, à cause de l'arrêt du nucléaire, reste le plus gros producteur de CO_2 d'Europe, malgré une utilisation massive d'énergies renouvelables.

Mais les besoins sont immenses et dépassent largement les possibilités du nucléaire actuel, même en accordant une grande part aux renouvelables. En effet les études prospectives montrent que l'approvisionnement en uranium, nécessaire pour ce type de réacteur, va rapidement poser problème même en cas de croissance modérée du nucléaire dans le monde. De plus, la complexité, le coût et la durée de construction de ces réacteurs rendent leur usage impossible sur une bonne partie de la planète.

Il est donc nécessaire d'analyser les possibilités des réacteurs de nouveau type, capables d'assurer à long terme, sans importation d'uranium et en n'utilisant que nos déchets nucléaires disponibles, une énergie propre, décarbonée et quasi inépuisable.

Un peu d'histoire

La création de la Terre se serait effectuée il y a 4,5 milliards d'années. C'était alors certainement un bon bouillon radioactif, avec tous les constituants de la table de Mendeleïev. Mais la période des éléments radioactifs étant ce qu'elle est, même les éléments à vie longue de l'ordre de 80 millions d'années, comme le plutonium-244, ont quasiment disparu. (On estime que dans un pot de fleurs avec un kilo de terre, il reste environ 10 becquerels de plutonium.) L'uranium aurait aussi disparu depuis longtemps si deux de ses isotopes, l'uranium 238 et l'uranium 235, n'avaient subsisté sur la Terre jusqu'à nos jours en raison de durées de vie exceptionnellement longues. La période de l'uranium 238 est de 4,5 milliards d'années. Celle de l'uranium 235 qui disparaît plus vite n'est « que » de 700 millions d'années. Alors que l'abondance des deux isotopes était au départ similaire, l'uranium naturel est constitué de nos jours à 99,3 % d'uranium 238, contre 0,70 % d'uranium 235. Les noyaux d'uranium 235 et 238 sont, avec ceux du thorium 232, les plus lourds existant à l'état naturel. Ils auraient été formés il y a très longtemps, lors de l'explosion de très grosses étoiles appelées supernovæ. L'uranium 235 reste donc le seul isotope fissile disponible dans la nature pour croiser la route de l'*Homo sapiens* arrivé beaucoup plus tard et lui permettre aujourd'hui de produire de l'énergie nucléaire, sujet de ce livre.

L'*Homo sapiens* est en effet apparu il y a très peu de temps, environ 150 000 ans, et va en quelques dizaines de milliers d'années, d'abord réussir à pousser les autres espèces humaines à l'extinction, puis réussir à coloniser l'ensemble de la planète de l'Afrique à l'Europe, du détroit de Behring à la Terre de Feu et de l'Asie à l'Australie. Il ne pouvait compter comme source d'énergie, outre la chaleur du soleil, que sur sa force musculaire et sur la combustion du bois. Cette source d'énergie demeure d'ailleurs aujourd'hui une ressource très importante pour beaucoup de populations.

La sédentarisation par transition agricole sera amorcée en Mésopotamie environ 9 000 ans avant notre ère. Elle va se répandre, créant des agglomérations de plus en plus importantes, des sociétés de plus en plus complexes et de nouveaux besoins énergétiques. L'utilisation de l'énergie animale et de l'esclavage se répandra pour disposer d'une énergie supplémentaire devenue nécessaire, à un tarif économiquement abordable.

L'arrivée au XIX^e^ siècle de la révolution industrielle va permettre par l'utilisation des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz…) une explosion de l'énergie disponible pour l'homme sur sa planète. C'est cette disponibilité qui allait conduire à un développement spectaculaire de la société et, au passage, à la suppression de l'esclavage devenu de moins en moins utile.

Le nucléaire et les énergies renouvelables vont arriver après la deuxième guerre mondiale, mais actuellement plus de 85 % de l'énergie de l'humanité restent toujours produits par ces énergies fossiles. C'est-à-dire par la combustion des stocks de produits carbonés accumulés depuis des millions d'années et disponibles sur la planète : charbon, pétrole, gaz, lignite, etc. Ces énergies fossiles continuent d'ailleurs à se développer avec

des techniques nouvelles comme le gaz de schiste issu de la fracturation hydraulique, ou avec les essais de captation des nodules de méthane au fond des mers, ou les extractions dans les sables bitumineux.

On continue à tirer des pipelines de gaz et de pétrole dans le monde entier alors que la planète brûle.



Figure 1 : Vue d'un paysage industriel.

Le réchauffement climatique

Cette utilisation intensive des énergies fossiles conduit à la libération de quantités colossales de CO_2 émises lors de leur combustion. En tout point de la planète, cette libération de CO_2 a conduit à une augmentation exponentielle depuis 1850, de la teneur de CO_2 dans l'air. Cette présence de CO_2 induit un effet de serre déjà largement décrit au XIX^{e} siècle et donc un réchauffement global de la planète.

Un Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a été créé (le GIEC) pour analyser ces effets. Il produit depuis 1990, des rapports périodiques qui montrent une évolution prévisible et quasi inéluctable de ce réchauffement climatique.

Sans vouloir reproduire ici toutes les conclusions du dernier rapport de 2021 [1], il faut cependant rappeler, pour en apprécier les enjeux, les principales conséquences annoncées dans le scénario dit à + 4 °C qui correspond à la continuation de la consommation d'énergies fossiles au rythme actuel.