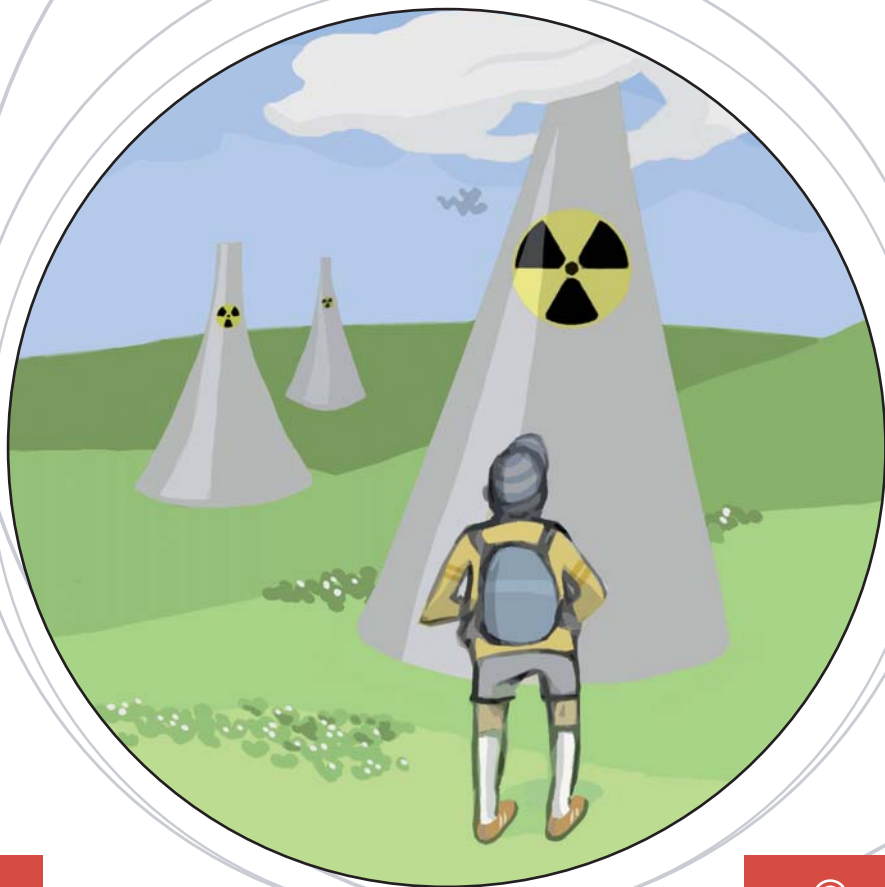




HENRI SAFA

*Préface de Catherine Césarsky*

# Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ?



## **Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ?**

---

**This page intentionally left blank**

# **Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ?**

---

**HENRI SAFA**

Préface de Catherine Césarsky



17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf  
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A

Mise en pages : Patrick Leleux

Imprimé en France  
ISBN : 978-2-7598-0430-6

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<sup>er</sup> 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

*À ma femme, Christine  
À mes enfants, Jean-Christophe, Vincent et Isabelle*

**This page intentionally left blank**

## SOMMAIRE

---

<i>Préface</i> .....	11
<i>Avant-propos</i> .....	13
<i>Introduction</i> .....	17
<b>Chapitre 1. D'où vient l'énergie nucléaire ?</b> .....	19
Le noyau atomique .....	20
L'énergie de liaison : une énergie colossale.....	29
La fission nucléaire .....	32
<b>Chapitre 2. La radioactivité</b> .....	35
Le temps de vie d'un atome radioactif .....	35
Décroissance radioactive.....	37
Les rayonnements alpha, bêta et gamma ( $\alpha$ , $\beta$ et $\gamma$ ).....	41
Comment se protéger des rayonnements ? .....	44
Les effets sur la santé : un mal ou un bien ? .....	47
La radioactivité naturelle.....	55
<b>Chapitre 3. Comment fonctionne un réacteur nucléaire ?</b> .....	65
La réaction en chaîne.....	65
Le cœur du réacteur.....	68
Les circuits de refroidissement.....	70
Le pilotage d'un réacteur .....	75
La gestion du fonctionnement .....	78
<b>Chapitre 4. Éléments de sûreté d'un réacteur nucléaire</b> .....	79
Le contrôle d'un réacteur.....	79
Les risques dans le nucléaire .....	82



Comment garantir la sûreté ?.....	88
Les accidents nucléaires .....	93
Les autorités de sûreté.....	101
<b>Chapitre 5. Que faire des déchets nucléaires ? .....</b>	<b>103</b>
Quels sont les déchets nucléaires ? .....	103
La classification des déchets .....	108
La radiotoxicité des déchets.....	110
Le traitement-recyclage du combustible utilisé .....	112
Les flux de déchets nucléaires .....	117
Le stockage des déchets .....	118
<b>Chapitre 6. L'uranium, un minerai pas comme les autres .....</b>	<b>123</b>
D'où vient l'uranium ? .....	123
Les mines d'uranium .....	125
L'extraction.....	127
La conversion.....	128
L'enrichissement .....	129
Les réserves d'uranium .....	135
Le prix de l'uranium.....	138
<b>Chapitre 7. L'économie du nucléaire .....</b>	<b>141</b>
L'énergie dans le monde.....	141
L'énergie en France .....	147
La production électrique.....	149
La structure des coûts .....	150
Les coûts d'investissements.....	151
Les coûts de fonctionnement.....	154
Les coûts du combustible.....	155
La rentabilité du nucléaire .....	157
<b>Chapitre 8. Le nucléaire industriel .....</b>	<b>159</b>
Les réacteurs nucléaires dans le monde.....	159
L'industrie électronucléaire.....	163
La chaleur industrielle.....	170
La propulsion.....	174
Les autres applications.....	176
Un monde sans CO <sub>2</sub> ?.....	180

<b>Chapitre 9. La non-prolifération .....</b>	<b>189</b>
Historique de la prolifération nucléaire .....	189
Les traités de non-prolifération .....	192
Les accords de désarmement nucléaire .....	195
La vérification du respect des traités .....	198
Le commerce de produits nucléaires .....	199
Nucléaire et terrorisme .....	200
L'arme nucléaire : Dissuasion ou Danger ?.....	201
<b>Chapitre 10. Le futur de l'énergie nucléaire .....</b>	<b>203</b>
Les réacteurs de 3 <sup>e</sup> génération .....	203
Les systèmes de 4 <sup>e</sup> génération.....	209
La recherche pour le nucléaire du futur .....	212
L'évolution du parc nucléaire français .....	216
La fusion nucléaire .....	217
<b>Conclusion .....</b>	<b>225</b>

**This page intentionally left blank**

## PRÉFACE

---

Henri Safa, dont j'ai eu souvent l'occasion d'apprécier les qualités d'animation scientifique à la direction de l'énergie nucléaire du CEA, nous montre ici un autre de ses talents, celui de diffuseur de connaissances vers le grand public. Il a relevé un défi de taille en abordant toutes les problématiques posées par l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire dans un livre d'un volume raisonnable. Ainsi le panorama embrassé est large car au-delà des incontournables bases de physique et d'ingénierie nucléaire, les questions de sûreté, de sécurité et d'économie du nucléaire sont abordées. Les enjeux énergétiques et climatiques ainsi que les questions posées par la gestion des déchets sont également traités. Certains sujets très intéressants, comme les applications industrielles du nucléaire dans des domaines autres que la production d'électricité, avaient été rarement abordés dans un ouvrage généraliste. Même le grave et très récent accident de Fukushima est brièvement décrit. Tous ces thèmes sont présentés clairement, sans dogmatisme, pour un lecteur curieux ayant un minimum de bagage scientifique.

À l'heure où s'amorce le débat sur la place de l'énergie nucléaire en France dans les décennies à venir, Henri Safa apporte une contribution importante pour éclairer nos concitoyens. Appréhender ces

éléments scientifiques et techniques est indispensable pour se forger une opinion et pour participer utilement à un débat qui demeure encore trop souvent passionnel. L'utilisation importante de l'énergie nucléaire pour générer l'électricité en France est la conséquence d'un choix raisonné et réfléchi. Les avantages en termes d'indépendance énergétique, de coût et de stabilité de l'offre sont connus ; des solutions sont avancées pour le stockage des déchets nucléaires, cependant que les impératifs de sûreté sont plus que jamais pris en compte. Le choix de l'énergie nucléaire nous permet d'avoir des émissions de gaz à effet de serre parmi les plus faibles des pays avec un niveau de développement comparable au nôtre. Aujourd'hui, le maintien de notre engagement en faveur du nucléaire s'accompagne d'un investissement massif dans les énergies renouvelables et dans l'amélioration de l'efficacité énergétique. Le CEA s'est d'ailleurs fortement mobilisé sur ces thématiques, avec un niveau de financement comparable à celui qui est dévolu au nucléaire de 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> génération. Des synergies apparaissent, en particulier pour la recherche amont : matériaux, nanotechnologies, chimie, simulations numériques.

J'attache beaucoup d'importance à la pertinence et à la qualité de l'offre française en matière de formations nucléaires. Cet ouvrage, qui s'adresse à un public très large, constituera de plus pour les étudiants francophones un texte de référence précieux qui leur donnera une vision globale de l'énergie nucléaire, complémentaire des connaissances techniques plus pointues constituant le cœur des enseignements dispensés.

Catherine CÉSARSKY  
Haut-Commissaire à l'énergie atomique

## AVANT-PROPOS

---

L'homme a besoin d'énergie pour son développement, pour ses besoins de base, naturellement, comme la nourriture et le chauffage, mais également pour son développement économique avec l'industrie, les transports et la santé. Dans le chapitre consacré à l'économie, le lecteur pourra constater que le développement d'un pays est systématiquement accompagné d'un besoin croissant en énergie. Malgré les améliorations constantes en matière d'efficacité, l'appétit énergétique des pays en développement ira inévitablement croissant pour deux raisons : leur population augmente et elle aspire à un confort au moins équivalent à celui des pays riches. À l'ère industrielle, nos civilisations occidentales se sont fortement développées grâce à la découverte et à l'utilisation des énergies fossiles : le charbon, le pétrole et le gaz. Depuis, celles-ci ont été exploitées à outrance et les réserves bon marché de pétrole et de gaz commencent à s'épuiser. Aujourd'hui, un pays comme la Chine, peuplé d'un milliard trois cents millions d'habitants, se trouve en pleine expansion économique, avec une croissance qui avoisine régulièrement les 10 % depuis plusieurs années. Ce fort développement draine une boulimie énergétique démesurée, si bien que le pays se voit contraint de construire et de mettre en opération une centrale électrique au charbon toutes les semaines !

Le charbon, seule énergie fossile dont les ressources restent abondantes sur terre (nous en avons pour plusieurs centaines d'années de réserves), mais ô combien polluante ! Implacablement, le dérèglement climatique se met en marche, notre biosphère ne pouvant s'accommoder d'un relâchement annuel excédant 4 Gigatonnes d'équivalent carbone alors que nous en rejetons près du double aujourd'hui, et en rejetons probablement trois fois plus en 2020. Les énergies dites renouvelables (hydraulique, éolienne, solaire, géothermique, marines) peuvent et doivent être développées pour en tirer profit partout où cela est possible. La grande hydraulique est déjà quasiment pleinement exploitée de par le monde. Quelques gains peuvent être attendus dans une mise en valeur plus large de la petite hydraulique. Cependant, l'eau douce devient une ressource rare et seuls quelques pays ont le privilège d'en disposer à profusion. Il faudra même dans un futur proche en produire en grande quantité par dessalement de l'eau de mer, ne serait-ce que pour satisfaire les besoins vitaux de consommation et d'hygiène. Le vent et le soleil sont par nature intermittents et ne pourront se substituer aux productions massives d'énergie en base. Ils ne fourniront au mieux qu'un complément, par ailleurs fort utile pour compenser au moins en partie l'accroissement de la demande. La géothermie est une énergie encore fort mal utilisée. Elle pourrait être plus largement exploitée pour la régulation thermique des habitations, surtout dans les pays tempérés. Alliée à une bonne isolation des bâtiments, elle devrait pratiquement éliminer le recours au fuel ou au gaz pour le chauffage domestique. Reste que les besoins mondiaux vont croissant et nécessitent de trouver urgentement une source d'énergie abondante, durable et qui ne contribuerait pas à aggraver le réchauffement de la planète.

Les étoiles nous ont fait don d'un élément naturel tout à fait exceptionnel : l'uranium. Par chance, l'un de ses isotopes, l'uranium 235, est fissile et, bien que radioactif, il en subsiste encore dans la croûte terrestre 4,5 milliards d'années après la formation du système solaire. Son abondance est relativement faible mais elle est suffisante pour

pouvoir en tirer beaucoup d'énergie sans rejeter de gaz à effet de serre. Ce seul constat justifie pour le moins que l'on s'y intéresse. La technologie nucléaire est encore jeune, à peine une soixantaine d'années. L'apprentissage délicat de sa domestication a provoqué quelques accidents sérieux qui ont temporairement obéré son émancipation. Le récent accident survenu au Japon sur la centrale de Fukushima rappelle à redoubler de prudence si l'on souhaite développer son utilisation à grande échelle. Quoi qu'il en soit, l'humanité, dont les besoins sont toujours croissants, ne pourra faire fi d'un combustible qui recèle en quelques grammes de matière l'équivalent énergétique d'une tonne de carburant classique.



**This page intentionally left blank**

## INTRODUCTION

---

Ce livre ne se veut pas un ouvrage purement scientifique. Il reste à vocation largement ouverte à tout public, même s'il fait quelquefois appel à des connaissances ou à des notions scientifiques lors d'une analyse détaillée portant sur un sujet particulier

Il est divisé en dix chapitres, qui peuvent se lire soit en continu, soit indépendamment les uns des autres, chaque chapitre ayant sa cohérence propre. Le fil conducteur adopté traite des aspects de physique fondamentale (le noyau atomique et la radioactivité), aborde le fonctionnement des réacteurs, avec un éclairage particulier sur la sûreté et les déchets nucléaires, pour finir sur quelques concepts proposés par les chercheurs pour les réacteurs du futur. Au passage, les aspects économiques, industriels et politiques et les applications finales (utilisation de l'électricité et de la chaleur), déterminants pour comprendre les évolutions actuelles du nucléaire, sont évoqués.

Étant donné l'enjeu climatique et la raréfaction des ressources fossiles, il est raisonnable de supposer une montée en puissance du nucléaire au cours du XXI<sup>e</sup> siècle quand bien même des accidents de parcours pourront ici ou là temporairement ralentir son expansion.

Cet ouvrage tente d'établir un état des lieux dans le monde (vu forcément à travers un miroir déformant français) puis de tracer des pistes pour le futur. Où en est-on ? Quels sont les progrès attendus ? Les technologies actuelles permettent-elles d'envisager un monde sans CO<sub>2</sub> ? Que pourra nous apporter le nucléaire ?

En conclusion, une esquisse du nucléaire du futur est projetée, en indiquant deux voies possibles : la fission ou bien la fusion. La fusion a encore un long chemin à parcourir pour arriver à maturité industrielle. En revanche, la fission aux neutrons rapides semble aujourd'hui incontournable. Cependant, son déploiement est trop lointain ou incertain pour que les industriels s'y investissent de manière importante. Or, l'urgence de l'enjeu requiert qu'un effort public bien plus conséquent y soit consacré.

# 1

---

## D'où vient l'énergie nucléaire ?

*« C'est presque aussi incroyable que si vous aviez tiré un obus de 15 pouces sur un mouchoir en papier et qu'il rebondisse dessus et revienne vous toucher. »*

Enerst Rutherford, en 1911, bombardant une feuille d'or avec des particules alpha et invalidant le modèle atomique de « *plum pudding* » de Joseph J. Thomson qui décrivait l'atome comme un gâteau mou chargé positivement remplissant tout l'espace à l'intérieur duquel des électrons pouvaient se mouvoir.

Toute la matière que nous connaissons est formée d'atomes. La terre que nous foulons, les objets que nous fabriquons, les roches, les plantes, les êtres vivants et même l'air que nous respirons sont des assemblages d'éléments chimiques connus comme l'hydrogène, l'azote, l'oxygène, le silicium, le fer ou l'uranium. Chaque atome est constitué d'un noyau central comprenant une charge électrique positive autour duquel gravitent des électrons de charge opposée. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons exclusivement au noyau central de l'atome.

Russie, l'Inde et le Japon. La phase de construction a démarré et doit durer une douzaine d'années. Le coût de construction, initialement évalué à 4,7 G€ (en € de 2000) a fait l'objet d'une réévaluation à 12,8 G€ en 2008. Si tout se passe sans accroc, les premières expériences réelles de fusion D-T ne se feront que vers 2027.

Le principal objectif technique d'ITER sera de démontrer que l'on peut atteindre et dépasser le « *breakeven* » pendant au moins 1000 secondes (en dégageant au moins 5 fois plus d'énergie qu'on n'en consomme pour chauffer et confiner le plasma, soit  $Q = 5$ ). Les difficultés technologiques d'ITER concernent la tenue des matériaux (les neutrons de fusion ont une énergie de 14 MeV, c'est-à-dire qu'ils sont encore plus énergétiques que les neutrons des réacteurs rapides), les couvertures tritigènes au lithium, le divertor (dispositif servant à extraire l'hélium et les impuretés du plasma), l'extraction de l'énergie et la minimisation et la gestion des matériaux irradiés. Si les futures expériences qui vont être réalisées sur l'installation ITER en 2030-2040 s'avèrent prometteuses, la construction d'un véritable démonstrateur de réacteur à fusion pourra alors être envisagée au-delà de 2050.

## Conclusion

La découverte de la radioactivité par Henri Becquerel en 1896 a stimulé nombre de physiciens de la première moitié du  $xx^e$  siècle pour élucider les mystères des interactions à l'œuvre à l'intérieur du noyau atomique et mieux préciser l'extraordinaire énergie qu'il y concentre. La seconde moitié du siècle dernier a vu l'émergence d'une technologie relativement simple capable de récupérer une partie de cette énergie grâce à la fission nucléaire de l'uranium. Une autre technologie possible, la fusion nucléaire, s'est avérée plus difficile que prévue à mettre en œuvre et demande encore un travail conséquent aux chercheurs avant d'envisager une quelconque application industrielle.

Cependant, l'utilisation de l'énergie nucléaire suscite beaucoup d'interrogations dans le public. On entend le plus souvent dire « le nucléaire est dangereux » ou « on ne sait pas se débarrasser des déchets nucléaires ». Certes, toute activité humaine comporte des risques et produit des déchets. Mais sait-on seulement quels sont exactement les risques liés au fonctionnement d'un réacteur ? Connaît-on la quantité