



**MAXENCE CORDIEZ
STÉPHANE SARRADE**

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Pour un monde en transition

EN 100 QUESTIONS



TALLANDIER

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

en 100 questions

DES MÊMES AUTEURS

MAXENCE CORDIEZ

Énergies, Paris, Tana Éditions, coll. « Fake Or Not », 2022.

STÉPHANE SARRADE

Homo energeticus. Pour une transition bas carbone, Paris, Éditions humenSciences, 2023.

De la Joconde aux tests ADN, jusqu'où ira la chimie ?, Paris, Éditions Le Pommier, 2015.

La Chimie d'une planète durable, Paris, Éditions Le Pommier, 2011.

La Chimie est-elle réellement dangereuse, Paris, Éditions Le Pommier, 2010.

Quelles sont les ressources de la chimie verte ?, Paris, Éditions EDP Sciences, 2008.

MAXENCE CORDIEZ
STÉPHANE SARRADE

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE en 100 questions

Pour un monde en transition

TALLANDIER

Collection « en 100 questions »
créée par François-Guillaume Lorrain

Infographies : © Julien Peltier / Éditions Tallandier, 2025

© Éditions Tallandier, 2025
48, rue du Faubourg-Montmartre – 75009 Paris
www.tallandier.com

ISBN : 979-10-210-5887-3

À Thérèse-Marie, Nicole, Dominique et Michel,
des parents qui débordent d'énergie...

Introduction

Quelle place pourrait occuper l'énergie nucléaire dans notre bouquet énergétique ?

Répondre à cette question nécessite de s'en poser beaucoup d'autres car les interrogations relatives à l'énergie nucléaire couvrent de nombreux domaines : historiques, politiques, sociaux, environnementaux, économiques et techniques. C'est ce que nous nous sommes proposé de faire au travers de cet ouvrage : essayer de répondre factuellement à des questions que la nouvelle dynamique mondiale autour de l'énergie nucléaire met en visibilité. C'est dans un contexte de lutte contre le changement climatique et de besoin de renforcer la sécurité d'approvisionnement énergétique qu'il devient nécessaire de se forger une opinion informée concernant cette source d'énergie qui, notamment en France, est souvent cause de clivage.

Depuis la découverte de la radioactivité par Henri Becquerel à la fin du XIX^e siècle, la connaissance de la matière et la domestication de l'énergie colossale contenue au cœur du noyau de certains atomes n'a eu de cesse de se développer. La compréhension des mécanismes de la radioactivité puis de la fission – grâce aux travaux de

INTRODUCTION

Lise Meitner et d’Otto Hahn – connut une accélération fulgurante durant la première moitié du xx^e siècle et particulièrement durant la Seconde Guerre mondiale avec le projet Manhattan, qui aboutit en 1945 aux bombardements d’Hiroshima et Nagasaki. C’est peut-être là le « péché originel » de l’énergie nucléaire, développée initialement pour des applications militaires et très tôt associée dans l’imaginaire populaire à la destruction de masse.

Pourtant, cette énergie a bien plus à offrir, de par ses caractéristiques particulièrement favorables en matière environnementale, climatique, géostratégique et de développement économique. Dès les années 1950, plusieurs pays, dont les États-Unis, l’URSS, la France et le Royaume-Uni, commencèrent à mettre au point et développer des applications civiles de l’énergie nucléaire. Améliorer les conditions de vie par un accès facilité à l’énergie, tout en limitant le recours au charbon, voilà une promesse à laquelle elle devait répondre. Ce fut particulièrement vrai en France, pays pauvre en charbon, qui fit ce choix de façon massive dans les années 1970, au lendemain du premier choc pétrolier, pour réduire sa dépendance aux combustibles fossiles importés.

Le rôle des technologies nucléaires dans le domaine civil ne se limita pas à la production d’électricité. Très tôt, elles permirent de développer de nouveaux moyens d’imagerie, de diagnostic et de traitement de certaines maladies, et notamment des cancers. Les recherches menées à ce titre contribuèrent à améliorer significativement la compréhension du fonctionnement des organismes et à développer des traitements pour certaines maladies. Les gains ne furent donc pas seulement directs. Les réactions nucléaires servirent aussi à stériliser du matériel et des aliments par rayonnement, ce qui présente l’avantage

INTRODUCTION

– par rapport à la stérilisation chimique – d'éviter le risque de persistance du composé chimique, servant à stériliser, sur le matériel ou l'aliment traité. Par les expériences menées dans les réacteurs de recherche, l'énergie nucléaire permit enfin d'améliorer la connaissance de la matière, de ses propriétés, de son vieillissement, avec de nombreux progrès techniques à la clé tels que la qualification de nouveaux matériaux pour l'industrie nucléaire, l'aérospatiale, l'électronique, etc.

À l'échelle mondiale, le développement de l'énergie nucléaire fut cependant bien plus modéré qu'attendu dans les années 1970-1980. Outre l'opposition aux armes nucléaires et aux essais pendant la guerre froide, plusieurs accidents, plus ou moins graves, freinèrent le déploiement des réacteurs électronucléaires. Ce fut notamment le cas de celui de Three Mile Island en 1979 aux États-Unis, mais surtout de ceux de Tchernobyl en 1986 en URSS (actuelle Ukraine) et de Fukushima Daiichi en 2011 au Japon. À chaque fois, ces accidents portèrent un coup d'arrêt aux constructions de nouveaux réacteurs et incitèrent certains États à envisager l'abandon de cette source d'énergie. Ces décisions furent confortées, à des moments de l'histoire auxquels les combustibles fossiles étaient bon marché et la gravité du réchauffement climatique encore peu reconnue par la population.

Aujourd'hui, la situation a changé. La pandémie de Covid en 2020 a fait prendre conscience à l'Union européenne de certaines fragilités industrielles et des limites d'une politique dirigée uniquement par les marchés. L'invasion de l'Ukraine par la Russie et l'instrumentalisation par cette dernière de son gaz fossile, dont l'Europe était profondément dépendante, ont largement contribué à la crise de l'énergie de 2021-2022. De plus,

INTRODUCTION

le réchauffement climatique apparaît comme une menace existentielle exigeant une réponse aussi rapide que déterminée, laquelle consiste principalement à se sevrer des combustibles fossiles qui constituent encore l'essentiel de l'approvisionnement énergétique européen.

Toutes ces raisons ont entraîné un rapide retour en grâce de l'énergie nucléaire en Europe et dans le monde. De nombreux pays n'exploitant pas ou plus de centrales nucléaires envisagent d'en construire. C'est le cas de la Pologne et de l'Italie, par exemple. D'autres ayant souhaité fermer tout (Belgique, Suède) ou partie (France) de leurs réacteurs reviennent sur ces politiques et confirment le rôle à long terme de l'énergie nucléaire dans leurs bouquets énergétiques. Les stratégies diffèrent selon les pays, mais les attentes vis-à-vis de cette source d'énergie évoluent, de même que les technologies. D'un rôle quasi-exclusivement électrogène, l'énergie nucléaire est dorénavant considérée pour alimenter des industries énergivores en chaleur, ou servir des réseaux de chaleur urbains. Il est également envisagé qu'elle soit employée à l'avenir pour produire du dihydrogène bas carbone et des molécules dérivées en remplacement de certains usages du pétrole, que ce soit pour la chimie (polymères, médicaments...) ou l'énergie (e-carburants).

Différentes technologies et stratégies économiques sont explorées par les États et entreprises du secteur énergétique afin de servir au mieux ces nouveaux besoins. Ce n'est sûrement pas un hasard si certains géants américains du numérique investissent massivement dans l'énergie nucléaire de fission, voire de fusion. Leurs besoins attendus en électricité pour alimenter leurs *data centers* justifient la création ou la prise de contrôle de start-up prometteuses, voire de réhabiliter certains réacteurs mis

INTRODUCTION

à l'arrêt pour raisons économiques tels que le réacteur n° 1 de la centrale de Three Mile Island en Pennsylvanie, dans le cadre d'un contrat avec l'entreprise Microsoft.

Au-delà du regain d'intérêt qu'elle suscite dans de nombreux pays, et de l'effervescence de projets constatée depuis plusieurs années, l'énergie nucléaire reste méconnue du grand public, souvent également des décideurs, et par là même sujette à de nombreux fantasmes. Sa complexité en fait un objet difficile à cerner par une large partie de la population, qui n'en comprend pas toujours le fonctionnement, les risques, l'intérêt, le potentiel et les limites. Cela explique probablement pourquoi les débats entourant l'énergie nucléaire, en France et dans certains autres pays, sont traditionnellement clivés entre défenseurs et opposants.

Comme toute activité humaine, l'énergie nucléaire présente des défauts – pas nécessairement ceux mis le plus souvent en avant dans le débat public – et aussi des qualités. Il convient de les comprendre pour évaluer le rôle qu'elle pourra jouer face au défi de la décarbonation. Ne pas en voir les limites conduirait à surestimer ce potentiel, avec pour résultat un risque de conserver une dépendance aux combustibles fossiles. Refuser d'en voir les qualités reviendrait à se passer d'un outil particulièrement performant face à l'enjeu existentiel que constitue la lutte contre le réchauffement climatique. Il y a donc un bénéfice certain pour la société à aborder les questions énergétiques de manière renseignée, réfléchie et dépassionnée. C'est ainsi que nous augmenterons nos chances de parvenir à nous passer des combustibles fossiles, au bénéfice du climat et de notre économie, leur importation grecrant chaque année la balance commerciale française de quelques dizaines de milliards d'euros.

INTRODUCTION

Le besoin d'information, de recul et de modération en matière de débat autour des questions énergétiques est particulièrement prégnant en ce qui concerne l'énergie nucléaire, mais il concerne en pratique toutes les composantes de ce débat, qu'il s'agisse des autres énergies prises séparément comme des économies d'énergie.

Si l'énergie nucléaire ne suffirait pas à elle seule à se passer des combustibles fossiles, que ce soit à l'échelle nationale, européenne ou mondiale, elle a indubitablement un rôle important à jouer dans l'atteinte de la neutralité carbone, en complément indispensable des autres énergies faiblement carbonées (hydroélectricité, éoliennes, panneaux solaires photovoltaïques, pompes à chaleur, géothermie, biogaz, biocarburants, etc.) et des économies d'énergie. Comprendre quel peut être ce rôle, et à quelles conditions il pourra se concrétiser, est l'ambition de cet ouvrage.

Les cent questions qui suivent visent à lever quelque peu le voile sur l'énergie nucléaire et son exploitation à des fins civiles : production d'énergie, de radio-isotopes médicaux, de recherche, etc. Les applications civiles et militaires étant aujourd'hui en large partie découplées, et les applications civiles de l'énergie nucléaire étant vastes et complexes, nous avons fait le choix de nous limiter à ces dernières. Les questions de défense et de lutte contre la prolifération nucléaire ne sont donc que brièvement abordées, afin de réservier l'essentiel de l'ouvrage au domaine civil. Pour tenter d'offrir au lecteur une compréhension la plus large possible du fonctionnement et des enjeux de l'énergie nucléaire, nous avons choisi de débuter par quelques bases physiques permettant de comprendre les réactions qui ont lieu dans un réacteur nucléaire. Ces bases sont suivies par une présentation du

INTRODUCTION

fonctionnement technique des réacteurs, du cycle du combustible associé et des contrôles qui les entourent. Enfin, nous nous sommes attachés à passer en revue les défis auxquels fait face l'énergie nucléaire aujourd'hui et les éléments conditionnant le rôle qu'elle pourra jouer dans le futur paysage énergétique, en France et dans le monde.

Notre ambition est que cet ouvrage permette au lecteur de trouver les réponses aux questions qu'il peut se poser et, par là même, qu'il puisse se forger un avis éclairé quant au rôle et à l'avenir potentiel de l'énergie nucléaire.

80

L'énergie nucléaire est-elle compatible avec les énergies renouvelables ?

Les réacteurs nucléaires peuvent adapter leur puissance à l'équilibre offre/demande même si, pour des raisons économiques, il est pertinent qu'ils soient exploités avec le facteur de charge le plus élevé possible¹. Cela doit inciter à développer d'autres leviers de flexibilité à même de répondre aux variations de la demande et de la production solaire et éolienne : stockage à différentes échelles de temps (infrajournalière, hebdomadaire et saisonnière) et décalage de la demande.

Une certaine complémentarité existe entre les productions électriques d'origine nucléaire ou solaire photovoltaïque. Le parc nucléaire est dimensionné pour la demande d'hiver, plus élevée du fait du chauffage. La planification des maintenances en été apporte de la flexibilité saisonnière. À l'inverse, les panneaux solaires photovoltaïques produisent davantage en été, avec une production centrée sur le milieu de journée, quand la demande est la plus importante. Cela facilite le positionnement d'opérations

1. Voir la question 78 : « La production d'électricité nucléaire est-elle flexible ? », p. 287.

de maintenance des réacteurs nucléaires en été, tout en aidant à absorber une éventuelle augmentation de la demande estivale, notamment liée à la climatisation.

Le gestionnaire du réseau de transport d'électricité RTE a publié en 2021 une étude prospective approfondie portant sur le système électrique français². Celle-ci montre non seulement la pertinence d'un développement conjoint de l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables, mais aussi les risques qu'il y aurait à éliminer certaines sources d'énergie. En effet, les scénarios sans énergie nucléaire supposent un développement bien plus soutenu de toutes les énergies renouvelables, augmentant le risque d'échec (acceptabilité, paris technologiques, contraintes de renforcement du réseau, coût des moyens de stockage, etc.). En outre, en cas d'incapacité à suivre les trajectoires de déploiement de telle ou telle énergie renouvelable, d'isolation des bâtiments, de flexibilisation de la demande, il serait bien plus difficile de se reporter sur les autres énergies renouvelables dont les trajectoires de déploiement devraient par défaut être très ambitieuses.

L'étude de RTE montre également que les scénarios sans énergie nucléaire nécessitent de construire entre 20 et 29 GW de centrales à gaz, en faisant l'hypothèse qu'en 2050 celles-ci ne seraient que peu sollicitées et pourraient être alimentées uniquement avec des gaz renouvelables (biogaz et dihydrogène). Ce pari porte un risque d'échec vis-à-vis des objectifs de décarbonation. En cas de non-atteinte – probable – de l'une ou l'autre des trajectoires (isolation du bâti ou déploiement de certaines énergies renouvelables), ces centrales à gaz seraient amenées

2. RTE, *Futurs énergétiques 2050*, 2022.

LE NUCLÉAIRE DANS LE PAYSAGE ÉNERGÉTIQUE

à produire davantage d'électricité en consommant du gaz fossile.

De la même manière, un bouquet qui reposerait uniquement sur de l'énergie nucléaire et hydraulique n'est pas non plus réaliste, étant donné le nombre de réacteurs que cela impliquerait et les incertitudes quant à la capacité de la filière nucléaire de construire plus que les 14 réacteurs EPR envisagés d'ici 2050.

Opter pour un bouquet électrique reposant à la fois sur de l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables, en plus des économies (efficacité et sobriété), offre des marges et augmente la probabilité de parvenir à se passer des combustibles fossiles. Non seulement aucun levier de décarbonation, en matière de production comme d'économie d'énergie, ne doit être négligé, mais chaque trajectoire doit encore être surdimensionnée. Cela permet d'anticiper et de compenser un éventuel échec partiel de certaines trajectoires visées. Cette approche réduit au maximum le risque de recours au gaz fossile pour la production d'électricité, augmentant ainsi la probabilité d'atteindre la neutralité carbone en 2050.

Table des matières

Introduction	9
GÉNÉRALITÉS	17
1. Qu'est-ce que l'énergie ?	19
2. Qu'est-ce qu'un atome ?.....	23
3. Qu'est-ce qu'une désintégration radioactive ?	27
4. Y a-t-il de la radioactivité dans la nature ?.....	30
5. Quelle est la différence entre irradiation et contamination radioactive ?	32
6. Quels sont les risques posés par les rayonnements ionisants ?.....	35
7. Qu'est-ce qu'une réaction nucléaire ?.....	37
8. Qu'est-ce que la fission nucléaire ?.....	40
9. Pourquoi parle-t-on de réaction en chaîne ?....	43
10. Neutrons thermiques ou neutrons rapides ?.....	46
11. Qu'est-ce que la fusion nucléaire ?	50
12. Depuis quand sait-on fissionner un atome ? ...	54
13. Quelles furent les premières applications de l'énergie nucléaire ?	59

TABLE DES MATIÈRES

14. Des réacteurs naturels ont-ils existé par le passé ?	63
15. À quoi sert l'énergie nucléaire aujourd'hui ? ...	66
 LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES	69
16. Comment fonctionne un réacteur nucléaire ?	71
17. Pourquoi existe-t-il différents types de réacteurs nucléaires ?	75
18. Quels sont les types de réacteurs exploités en France ?.....	79
19. Pourquoi parle-t-on de réacteurs de 1 ^{re} , 2 ^e , 3 ^e ou 4 ^e génération ?	82
20. Qu'est-ce qu'un EPR ?	86
21. Pourquoi la construction de l'EPR de Flamanville a-t-elle pris autant de retard ?	89
22. Quelles différences entre l'EPR et l'EPR2 ?	93
23. À quoi servent les réacteurs nucléaires de recherche ?	96
24. Sait-on démanteler les réacteurs nucléaires ? ...	99
 LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE	103
25. Qu'est-ce que la sûreté nucléaire ?	105
26. Sûreté et sécurité nucléaire : quelles différences ?.....	109
27. Qu'est-ce que l'échelle INES ?.....	111
28. Un réacteur peut-il exploser comme une bombe nucléaire ?	114
29. Comment la sûreté nucléaire est-elle garantie en France ?	117

TABLE DES MATIÈRES

30. La fusion de l'IRSN et de l'ASN en 2025 risque-t-elle de compromettre la sûreté nucléaire ?	120
31. Quelle est la durée de vie d'une centrale nucléaire ?.....	123
 LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE	127
32. Qu'est-ce que l'uranium ?	129
33. Comment extrait-on l'uranium ?.....	132
34. Où est extrait l'uranium ?	135
35. Pourrait-on un jour manquer d'uranium ?	138
36. Pourquoi enrichit-on l'uranium ?	142
37. Comment enrichit-on l'uranium ?.....	144
38. De quels stocks d'uranium dispose la France sur son territoire ?	148
39. Pourquoi la France retraite-t-elle le combustible usé ?.....	151
40. Pourquoi dit-on que les piscines de la Hague sont saturées ?	155
 NUCLÉAIRE CIVIL OU MILITAIRE ?	159
41. Quels États sont dotés de la bombe nucléaire ?	161
42. Qu'appelle-t-on prolifération nucléaire ?.....	163
43. Toutes les activités nucléaires sont-elles également proliférantes ?	167
44. Le nucléaire civil permet-il d'accéder au nucléaire militaire ?	170

TABLE DES MATIÈRES

LA GESTION DES DÉCHETS NUCLÉAIRES	173
45. Quelle est la différence entre un déchet et une matière radioactifs ?	175
46. Tous les déchets nucléaires sont-ils équivalents ?	177
47. Comment les déchets nucléaires sont-ils gérés ?	181
48. Qu'est-ce que le stockage géologique profond ?	184
49. Les autres pays gèrent-ils leurs déchets nucléaires différemment ?	188
50. La France exporte-t-elle ses déchets ?	191
51. Comment être sûr que les déchets sont bien gérés ?	194
ENVIRONNEMENT	197
52. L'énergie nucléaire peut-elle contribuer à lutter contre le changement climatique ?	199
53. Les centrales nucléaires consomment-elles beaucoup d'eau ?	203
54. Les centrales nucléaires sont-elles vulnérables face au réchauffement climatique ?	206
55. Est-il dangereux de vivre à côté d'une centrale nucléaire ?	211
56. Quels impacts l'énergie nucléaire a-t-elle sur l'environnement ?	214
57. L'énergie nucléaire utilise-t-elle beaucoup de matériaux ?	217

TABLE DES MATIÈRES

LES ACCIDENTS NUCLÉAIRES	221
58. Qu'est-ce qu'un accident nucléaire ?	223
59. Qu'est-ce qui a causé l'accident de Three Mile Island ?.....	226
60. Qu'est-ce qui a causé l'accident de Tchernobyl ?.....	228
61. Nuage de Tchernobyl : le gouvernement français a-t-il menti ?.....	231
62. Qu'est-ce qui a causé l'accident de Fukushima ?	234
63. Quelle instance internationale est responsable de l'étude des conséquences des accidents nucléaires ?	237
64. Quelles furent les conséquences sanitaires des accidents de Three Mile Island, Tchernobyl et Fukushima ?.....	240
65. Quelles ont été les conséquences des accidents sur l'industrie nucléaire ?.....	244
66. Y a-t-il eu d'autres accidents nucléaires ?.....	247
67. Un accident est-il possible en France ?	251
INTERNATIONAL	255
68. Quels pays sont aujourd'hui capables de concevoir des réacteurs nucléaires ?	257
69. L'énergie nucléaire tend-elle à se développer ou à régresser dans le monde ?.....	259
70. Le niveau de sûreté est-il le même dans tous les pays du monde ?.....	262
71. Le choix des fournisseurs de technologie nucléaire dépend-il uniquement de considérations économiques ?...	266

TABLE DES MATIÈRES

72. Quelles sont les dépendances associées à l'énergie nucléaire ?	268
73. La guerre en Ukraine rebat-elle les cartes en matière de géopolitique de l'énergie nucléaire ?	271
74. Quelle place la France occupe-t-elle dans le paysage nucléaire civil mondial ?	273
75. Les réacteurs à neutrons rapides permettent-ils de réduire les dépendances associées à l'énergie nucléaire ?	276
 LE NUCLÉAIRE DANS LE PAYSAGE ÉNERGÉTIQUE	
76. Quel rôle l'énergie nucléaire joue-t-elle dans le bouquet énergétique mondial ?	281
77. L'énergie nucléaire sert-elle uniquement à produire de l'électricité ?.....	284
78. La production d'électricité nucléaire est-elle flexible ?.....	287
79. Pourquoi le parc nucléaire français fait-il du suivi de charge ?	290
80. L'énergie nucléaire est-elle compatible avec les énergies renouvelables ?	293
81. L'énergie nucléaire coûte-t-elle cher ?	296
82. L'énergie nucléaire permet-elle de réduire la dépendance énergétique de la France ?.....	299
83. Quel rôle la France envisage-t-elle pour l'énergie nucléaire ?	302
84. Quelle contribution à la décarbonation l'industrie nucléaire française peut-elle apporter ?	306

TABLE DES MATIÈRES

NUCLÉAIRE ET SOCIÉTÉ	309
85. L'industrie nucléaire est-elle transparente ?	311
86. Quelle est l'origine des mouvements antinucléaires ?.....	314
87. Quels sont les points de fixation dans la perception antinucléaire ?	317
88. Les mouvements antinucléaires ont-ils eu un impact ?	320
89. Pourquoi la centrale de Fessenheim a-t-elle été mise à l'arrêt ?.....	324
90. Quelle est la place de la filière nucléaire dans l'économie française ?	327
 LE FUTUR DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE	331
91. Qu'est-ce qu'un SMR, un AMR et un MMR ?.....	333
92. Quelles sont les différences structurantes entre un SMR et un réacteur de forte puissance ?	336
93. À quels marchés s'adressent les SMR et les réacteurs de forte puissance ?	339
94. Qu'est-ce qu'un réacteur à neutrons rapides ?	342
95. Pourquoi la France n'a-t-elle pas déployé industriellement de réacteurs à neutrons rapides ?	346
96. Les réacteurs au thorium sont-ils l'avenir de l'énergie nucléaire ?	350
97. Qu'est-ce que la transmutation et permettrait-elle de supprimer les déchets ?...	353

TABLE DES MATIÈRES

98. Les autres pays du monde sont-ils plus avancés en matière de réacteurs à neutrons rapides ?	357
99. À quoi pourrait servir l'énergie nucléaire demain ?.....	360
100. La fusion nucléaire sera-t-elle bientôt prête ?...	364
Glossaire	369
Liste des abréviations.....	375
Remerciements.....	379
Table des cartes et infographies.....	381