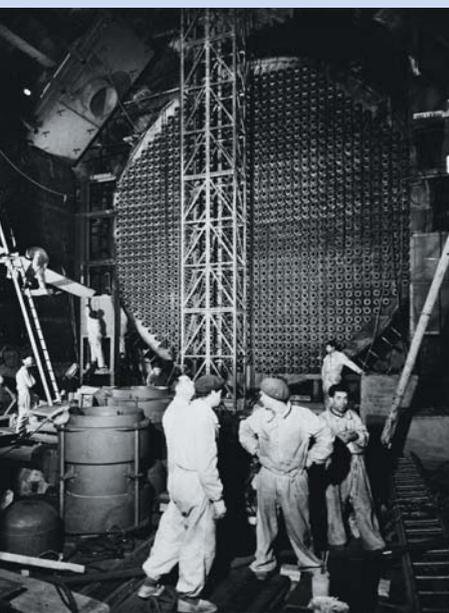


L'épopée de l'énergie nucléaire

Une histoire scientifique et industrielle



Paul REUSS

L'épopée de l'énergie nucléaire

Une histoire scientifique et industrielle

GÉNIE ATOMIQUE

L'épopée de l'énergie nucléaire

Une histoire scientifique et industrielle

Paul Reuss

Institut national des sciences et techniques nucléaires



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

Illustrations de couverture : Archives CEA © CEA/Jahan-J0145 ; Aménagement nucléaire de Golfech.
Vue aérienne © EDF. Médiathèque.

ISBN : 978-2-86883-880-3

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^{er} 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 2007

Introduction à la collection « Génie Atomique »

Au sein du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) est un établissement d'enseignement supérieur sous la tutelle du ministère de l'Éducation nationale et du ministère de l'Industrie. La mission de l'INSTN est de contribuer à la diffusion des savoir-faire du CEA au travers d'enseignements spécialisés et de formations continues, tant à l'échelon national, qu'aux plans européen et international.

Cette mission reste centrée sur le nucléaire, avec notamment l'organisation d'une formation d'ingénieur en « Génie Atomique ». Fort de l'intérêt que porte le CEA au développement de ses collaborations avec les universités et les écoles d'ingénieurs, l'INSTN a développé des liens avec des établissements d'enseignement supérieur aboutissant à l'organisation, en co-habilitation, de plus d'une vingtaine de Masters. À ces formations s'ajoutent les enseignements des disciplines de santé : les spécialisations en médecine nucléaire et en radiopharmacie ainsi qu'une formation destinée aux physiciens d'hôpitaux.

La formation continue constitue un autre volet important des activités de l'INSTN, lequel s'appuie aussi sur les compétences développées au sein du CEA et chez ses partenaires industriels.

Dispensé dès 1954 au CEA Saclay où ont été bâties les premières piles expérimentales, la formation en « Génie Atomique » (GA) l'est également depuis 1976 à Cadarache où a été développée la filière des réacteurs à neutrons rapides. Depuis 1958 le GA est enseigné à l'École des applications militaires de l'énergie atomique (EAMEA) sous la responsabilité de l'INSTN.

Depuis sa création, l'INSTN a diplômé plus de 4 000 ingénieurs que l'on retrouve aujourd'hui dans les grands groupes ou organismes du secteur nucléaire français : CEA, EDF, AREVA, Marine nationale. De très nombreux étudiants étrangers provenant de différents pays ont également suivi cette formation.

Cette spécialisation s'adresse à deux catégories d'étudiants : civils et militaires. Les étudiants civils occuperont des postes d'ingénieurs d'études ou d'exploitation dans les réacteurs nucléaires, électrogènes ou de recherches, ainsi que dans les installations du cycle du combustible. Ils pourront évoluer vers des postes d'experts dans l'analyse du risque nucléaire et de l'évaluation de son impact environnemental. La formation de certains officiers des sous-marins et porte-avions nucléaires français est dispensée par l'EAMEA.

Le corps enseignant est formé par des chercheurs du CEA, des experts de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), des ingénieurs de l'industrie (EDF, AREVA. . .) Les principales matières sont : la physique nucléaire et la neutronique, la thermohydrau-

lique, les matériaux nucléaires, la mécanique, la protection radiologique, l'instrumentation nucléaire, le fonctionnement et la sûreté des réacteurs à eau sous pression (REP), les filières et le cycle du combustible nucléaire. Ces enseignements dispensés sur une durée de six mois sont suivis d'un projet de fin d'étude, véritable prolongement de la formation réalisé à partir d'un cas industriel concret, se déroulent dans les centres de recherches du CEA, des groupes industriels (EDF, AREVA) ou à l'étranger (États-Unis, Canada, Royaume-Uni. . .) La spécificité de cette formation repose sur la large place consacrée aux enseignements pratiques réalisés sur les installations du CEA (réacteur ISIS, simulateurs de REP : SIREP et SIPACT, laboratoires de radiochimie, etc.)

Aujourd'hui, en pleine maturité de l'industrie nucléaire, le diplôme d'ingénieur en « Génie Atomique » reste sans équivalent dans le système éducatif français et affirme sa vocation : former des ingénieurs qui auront une vision globale et approfondie des sciences et techniques mises en œuvre dans chaque phase de la vie des installations nucléaires, depuis leur conception et leur construction jusqu'à leur exploitation puis leur démantèlement.

L'INSTN s'est engagé à publier l'ensemble des supports de cours dans une collection d'ouvrages destinés à devenir des outils de travail pour les étudiants en formation et à faire connaître le contenu de cet enseignement dans les établissements d'enseignement supérieur, français et européens. Édités par EDP Sciences, acteur particulièrement actif et compétent dans la diffusion du savoir scientifique, ces ouvrages sont également destinés à dépasser le cadre de l'enseignement pour constituer des outils indispensables aux ingénieurs et techniciens du secteur industriel.

Joseph Safieh
Responsable général
du cours de Génie Atomique

Vous savez que j'ai un esprit scientifique.
Or, récemment, j'ai fait une découverte bouleversante !
En observant la matière de plus près...
j'ai vu des atomes...
qui jouaient entre eux...
et qui se tordaient de rire !
Ils s'esclaffaient !
Vous vous rendez compte...
des conséquences incalculables que cela peut avoir ?
Je n'ose pas en parler, parce que
j'entends d'ici les savants !
— Monsieur, le rire est le propre de l'homme !
Eh oui !...
Et pourtant !
Moi, j'ai vu, de mes yeux vu...
des atomes qui : « Ha ! ha ! ha ! »
Maintenant, de quoi riaient-ils ?
Peut-être de moi ?
Mais je n'en suis pas sûr !
Il serait intéressant de le savoir.
Parce que si l'on savait ce qui amuse les atomes,
on leur fournirait matière à rire...
Si bien qu'on ne les ferait plus éclater que de rire.
Alors, me direz-vous, que deviendrait la fission
nucléaire ?
Une explosion de joie !

Raymond Devos (9 novembre 1922–15 juin 2006)
Matière à rire
Plon (1991)

Table des matières

Préface	xi
----------------------	----

Introduction	xiii
---------------------------	------

Chapitre 1 : Les prémices de l'énergie nucléaire

L'intuition de la structure atomique dès l'Antiquité	1
Les travaux précurseurs : Dalton, Mendeleïev... ..	1
La découverte des rayons X	2
La découverte de la radioactivité	3
La découverte du radium et du polonium	4
$E = mc^2$	6
L'image de l'atome se précise petit à petit	7
Le neutron postulé, puis mis en évidence	9
La découverte de la radioactivité artificielle	11
Les réactions par neutrons et l'énigme de l'absorption des neutrons par l'uranium	12
La découverte de la fission	13
L'idée de la réaction en chaîne de fissions et les brevets de l'équipe Joliot	14
La découverte du plutonium	22
L'ébauche de la neutronique	22
• Les moyens de calcul	22
• L'énergie des neutrons et la modération	23
• Les interactions entre les neutrons et la matière	23
• L'allure et les ordres de grandeur des sections efficaces des noyaux lourds	24
• La migration des neutrons	25
• Le calcul de la masse critique en théorie à un groupe	26
• L'amélioration du calcul du facteur de multiplication infini : la formule des quatre facteurs	27
• L'amélioration du traitement de la migration des neutrons : la théorie âge + diffusion	28
• Conclusion	28

Chapitre 2 : La genèse de l'énergie nucléaire

L'équipe française est disloquée.....	29
La pile CP1 de Fermi	29
Les recherches en Angleterre et au Canada pendant la guerre.....	31
Le projet Manhattan	32
Hiroshima et Nagasaki	35
La Guerre froide	37
L'Agence internationale à l'énergie atomique et Euratom	37
La reconstitution de l'équipe française et la naissance du CEA	38
Zoé.....	39
Les conférences de Genève.....	41
Les premières réalisations électronucléaires	42
Réacteurs à neutrons thermiques ou réacteurs à neutrons rapides ?.....	43
Les piles de Saclay EL2 et EL3.....	46
Les prototypes des réacteurs électronucléaires	47
• Les piles de Marcoule G1, G2 et G3	47
• La centrale des Monts d'Arrée (le réacteur EL4)	50
• La centrale Chooz A-1 (le réacteur SENA) et Tihange.....	50
Le programme UNGG de Chinon-1 à Bugey-1.....	51
Le programme « neutrons rapides »	53
• Le prototype : Rapsodie	53
• Le réacteur de puissance : Phénix, puis Superphénix.....	53
Le programme d'armes nucléaires, le PAT et le Redoutable	54
La création de l'IPSN et de la DSIN	56
La création de l'INSTN	56
Les développements de la « neutronique analytique »	58
• Les études de réseaux	58
• Les développements analytiques	59
• Les premiers codes de calcul	60
• Les premières résolutions numériques.....	60
La découverte du phénomène d'Oklo	61

Chapitre 3 : La maturité de l'énergie nucléaire

L'optimisme.....	65
Le lancement du programme REP français	66
Le développement de Framatome et la francisation du REP	67
Les développements dans les autres pays	72
La création d'Eurodif	74
L'usine de retraitement de La Hague.....	75
Superphénix : une bonne idée réalisée trop tôt.....	78
Le recyclage du plutonium dans les réacteurs à eau	79
Retraitement ou stockage en l'état des combustibles irradiés?	81
La politique « Carter »	81
Les autres filières industrielles de réacteurs	82
La bombe française	84
• La production de matières nucléaires	85

• Les essais nucléaires	85
• Les navires nucléaires	88
La course aux armements	89
Les autres applications de l'énergie nucléaire	91
Les réacteurs de recherche	94
Les développements de la « neutronique numérique »	96
Three Mile Island (1979) et Tchernobyl (1986)	100
Les développements de la « philosophie de la sûreté » ; l'IRSN et la DGRSN	101
Les inquiétudes de l'opinion publique ; la loi de 1991 sur les déchets	103
 Chapitre 4 : Perspectives de l'énergie nucléaire	
Introduction	109
Le projet EPR	110
L'étude du multirecyclage du plutonium	111
Le recyclage des matières fissiles issues du démantèlement des armes	114
L'étude du procédé SILVA	115
L'amplificateur d'énergie de Carlo Rubbia	116
La sûreté passive	118
L'incinération des déchets radioactifs	119
La démarche « réacteurs de quatrième génération »	119
La fusion nucléaire	122
 Conclusion : nucléaire et développement durable	
Les spécificités de l'énergie nucléaire	127
• Aspects technologiques	127
• Aspects économiques	128
• Aspects environnementaux	129
Les conditions pour un avenir à l'énergie nucléaire	130
• Poursuivre les recherches et les développements	130
• Assurer la formation des spécialistes	131
• Obtenir l'adhésion du public	131
Les atouts de l'énergie nucléaire pour un développement durable	133
 Postfaces et annexes	
Le témoignage d'un acteur de cette histoire	137
Le témoignage d'un acteur qui poursuivra cette histoire	149
Bibliographie	153
Principaux industriels, organismes et institutions nucléaires français ..	157
Index des noms cités	159

Préface

Le livre de Paul Reuss ne se veut, ni un ouvrage technique destiné aux seuls étudiants en Génie atomique, ni le livre d'un historien professionnel. L'histoire scientifique et industrielle de l'énergie nucléaire y est retracée de l'intérieur, par l'un des acteurs même de cette histoire, ingénieur et physicien au CEA. L'auteur met à profit sa connaissance approfondie de la physique des réacteurs pour nous faire comprendre les concepts qui ont permis le développement de différentes filières jusqu'à aujourd'hui. Un chapitre préliminaire résume opportunément les principales avancées qui menèrent de la découverte de la radioactivité à la découverte de la fission de l'uranium, jusqu'à la première réaction en chaîne de fission auto-entretenu réalisée dans la « pile » de Fermi en décembre 1942. Le dernier chapitre, en forme de conclusion, fait un bilan rapide des inconvénients et des atouts de l'énergie nucléaire dans la perspective d'un développement durable.

Les remarques de l'auteur sur les méthodes de modélisation ayant permis la réalisation des premiers réacteurs sont au cœur du livre. Les approches décrites ont un grand intérêt bien au-delà de leur objet de départ, la neutronique. Les réflexions sur les mérites de méthodes de ce type, malgré leurs limitations, comparées aux méthodes de simulation permises par les calculateurs modernes sonnent comme d'utiles avertissements contre le risque d'abdication du sens physique.

L'approche descriptive adoptée privilégie les réalisations françaises et les réacteurs de production d'électricité, sans omettre bien évidemment le contexte mondial, parfois déterminant, ou les programmes d'armes nucléaires. Ce choix de limitation du sujet traité évite au lecteur d'être submergé par la masse des informations exhaustives que l'on peut trouver dans des ouvrages spécialisés. Les données de base sur l'électronucléaire en France sont aisément accessibles en quelques tableaux.

La pile Zoé diverge à Chatillon le 15 décembre 1948. Il s'agit d'un outil de recherche. Au fil du récit, le lecteur voit se construire, à travers les succès et les difficultés, le projet qui permet aujourd'hui à notre pays de se passer presque complètement de centrales brûlant des combustibles fossiles pour produire l'électricité qui lui est nécessaire. L'auteur s'arrête en particulier sur l'épisode majeur que constitue pour la France le basculement judicieux de la filière graphite-gaz à uranium naturel, à la filière actuelle de réacteurs à eau sous pression et uranium légèrement enrichi (REP). L'épisode, comme celui plus récent de l'arrêt du réacteur Superphénix, incite à la réflexion sur le pouvoir supposé de la « technoscience », plus limité que beaucoup ne le croient, devant des décisions économiques ou politiques. Dans le cas de Superphénix, l'auteur souligne à juste titre les inconvénients de cette décision très politique.

Paul Reuss prend acte, sans s'y attarder, de l'impact des associations relayées par l'opinion publique sur le développement des programmes de centrales nucléaires. Il note que les inquiétudes principales évoluent avec l'actualité : retombées radioactives des essais nucléaires dans les années 1960, accident de Tchernobyl en 1986, discussions sur le stockage des déchets nucléaires aujourd'hui, sans entrer dans la controverse sur le décalage entre des risques perçus comme très élevés et les risques réels. Ce sont ces derniers que scientifiques et techniciens se sont attachés à réduire depuis les tout débuts de l'industrie nucléaire en France. C'est en effet une singularité de cette industrie que les questions de sûreté et de sécurité aient été prises en compte, de l'intérieur, aux différentes étapes de son développement. Je pense qu'on doit à cette approche, menée dans le cadre d'établissements publics, la remarquable absence d'accidents graves en France. L'énergie nucléaire, comme l'indique l'auteur, a atteint sa maturité, les compétences se sont diversifiées et multipliées. Les conditions sont réunies pour que les autorités de contrôle compétentes acquièrent leur totale indépendance.

Au sortir de la guerre, la recherche fondamentale en physique nucléaire et radiochimie a rendu possible la construction des premiers réacteurs et la formation des spécialistes du nucléaire. Une dizaine d'années plus tard, les liens entre physiciens et ingénieurs, entre CNRS et universités d'une part, et CEA de l'autre, s'étaient distendus au point de quasi disparaître sur toutes les questions touchant aux applications (sauf peut-être en radiochimie). Frédéric Joliot-Curie obtint alors que l'INSTN nouvellement créé pour l'enseignement en génie atomique, soit placé sous la double tutelle du CEA et de l'Éducation nationale. L'absence d'intérêt des organismes de recherche fondamentale combinée aux réticences du CEA, plus tard aussi d'EDF, Cogema ou même Andra, perdura malheureusement pendant de longues années, freinant les initiatives. Après Tchernobyl, lors des débats sur l'énergie nucléaire, on ne put que constater, et pas seulement en France, un déficit de recherche en amont tant sur de nouvelles filières de réacteurs que sur les déchets nucléaires.

Les programmes de recherches amorcés depuis une quinzaine d'années marquent le renouvellement des approches et un retour aux sources avec le développement de collaborations organisées entre les différents acteurs de la recherche. Le bouillonnement des recherches en cours est évoqué à travers le témoignage d'un jeune chercheur du CNRS, formant contrepoint au témoignage d'un pionnier du calcul des réacteurs au CEA.

Les conditions me semblent réunies pour que s'ouvre un nouveau cycle de l'histoire de l'énergie nucléaire. Le dernier chapitre du livre évoque les perspectives à moyen et plus long terme. Il montre en effet, non que le chemin est tout tracé, mais que des voies multiples sont ouvertes. Face au changement climatique induit par l'effet de serre, la nécessité absolue de réduire l'utilisation des combustibles fossiles sans même attendre leur épuisement, impose de conjuguer tous les efforts. Économies d'énergie prioritairement, développement des énergies solaires et éoliennes, parc de centrales nucléaires capables de fournir les grandes quantités d'énergie concentrée nécessaires aux grands centres urbains et industriels entre autres.

Hélène LANGEVIN-JOLIOT
Directeur de recherches émérite au CNRS

Introduction

Cette courte histoire de l'énergie nucléaire est destinée aux étudiants de l'Institut national des Sciences et Techniques nucléaires, en particulier aux élèves du *Génie atomique* ; j'espère qu'elle pourra intéresser aussi un public plus large.

Si la connaissance de l'histoire d'une science ou d'une technique à laquelle s'intéresse l'étudiant n'est certes pas en général sa préoccupation première, un éclairage minimal n'est cependant pas inutile. Comprendre comment sont nés et se sont forgés les grands concepts permet de mieux les appréhender et de les hiérarchiser. Et l'évocation des acteurs qui ont fait cette histoire est un hommage qui leur est dû. L'expérience montre que, si on les a quelque peu sensibilisés, les jeunes sont curieux de connaître un peu mieux leurs prédécesseurs et les conditions dans lesquelles ils ont travaillé.

Cet éclairage fait l'objet d'une conférence d'une demi-journée en introduction aux cours du *Génie atomique*. Ces quelques heures ne permettent pas de rentrer dans tous les détails. Ce document essaie de combler la curiosité de ceux qui voudront en savoir un peu plus.

Ce qui est relaté n'est pas vraiment original, sauf peut-être en ce qui concerne les développements de la neutronique : j'ai seulement fait un tri parmi les statistiques et parmi les anecdotes relatées dans les nombreux ouvrages beaucoup plus complets qui existent sur le sujet ; ceux qui m'ont été particulièrement utiles — sur l'histoire et sur la situation actuelle — sont cités dans la bibliographie.

J'ai délibérément choisi un point de vue privilégiant les travaux et les réalisations françaises. Bien entendu, ces travaux n'ont pas pu ignorer les avancées faites ailleurs dans le monde et se sont même le plus souvent appuyés sur ces avancées : c'est pourquoi les recherches et développements menés ailleurs — ceux de Démocrite, Mendeleïev, Bohr, Fermi, Rickover, Rubbia... comme bien d'autres — seront aussi évoqués.

J'ai décidé de me centrer sur l'aspect énergétique — et plus spécifiquement électrogène — de l'énergie nucléaire ; cependant là aussi le contexte — le projet Manhattan et l'arme nucléaire, les réacteurs fossiles d'Oklo, les réacteurs de recherche, le problème des déchets, etc. — ne peut pas être complètement passé sous silence. Mais je ne parlerai ni des accélérateurs, ni des applications de la radioactivité, ni des développements théoriques — tel le modèle standard de la physique des particules — non directement liés à la physique des réacteurs.

Enfin, sachant que je m'adresse préférentiellement à de futurs spécialistes de la physique des réacteurs, j'ai voulu apporter aussi un éclairage sur l'évolution des modélisations et des méthodes de calcul, en particulier sur la révolution qu'a amené dans ces problèmes

l'arrivée de l'informatique dans les années 1960. Cet éclairage sera donné sur l'exemple particulièrement significatif de la neutronique. Le lecteur non concerné peut sans inconvénient sauter ces passages.

J'ai adopté une présentation en quatre parties :

- la première sera consacrée aux prémices, c'est-à-dire à la construction de la physique nucléaire, qui a petit à petit découvert la structure atomique et a finalement abouti, avec la découverte de la fission, à l'idée de la réaction en chaîne ;
- la deuxième partie présentera les premières réalisations prototypes et la mise en place d'une sûreté nucléaire rigoureuse ;
- la troisième partie montrera le spectaculaire développement industriel qui a suivi, en France particulièrement, développement cependant freiné par des réticences de l'opinion suscitées, notamment, par deux très graves accidents ;
- dans la quatrième et dernière partie, seront évoquées les recherches actuelles cherchant plus particulièrement à répondre aux préoccupations alimentées par ces craintes d'accident, le problème des déchets, les risques de pénurie d'énergie et de dégradation irréversible de notre environnement ; cela nous permettra d'esquisser ainsi les perspectives de l'énergie nucléaire.

Enfin, les atouts de l'énergie nucléaire pour un « développement durable » seront résumés en guise de conclusion.

De courtes notices biographiques ont été jointes aux noms figurant dans l'index : elles permettront de faire plus ample connaissance avec les principaux acteurs de cette histoire de l'énergie nucléaire.

En annexe, on trouvera le témoignage de mon maître et ami Pierre Benoist : il relate son vécu de cette aventure. Mon jeune collègue Sylvain David donne ensuite sa vision de l'avenir. Avec Hélène Langevin-Joliot qui m'a fait l'honneur de préfacer ce livre, je les remercie chaleureusement.

P.R., Gif-sur-Yvette, novembre 2006.

