

HISTOIRE DE L'ÉNERGIE

3

Cyrille Foasso

Atomes sous surveillance

Une histoire de la sûreté nucléaire en France

L'accident de Fukushima, 25 ans après la catastrophe de Tchernobyl, est venu rappeler au monde l'ampleur des conséquences possibles d'un accident nucléaire.

Comment s'est construite la gestion du risque nucléaire en France au cours des 70 années d'histoire de cette source d'énergie, tant lors de la conception, la construction ou l'exploitation des centrales ? Comment les spécialistes de la sûreté ont-ils répondu à la question de l'accident maximal à prendre en compte ? Quels ont été les critères de sélection des sites où implanter les installations nucléaires ? À quelle distance minimale des zones fortement peuplées ? C'est ce que découvrira le lecteur dans cet ouvrage qui s'appuie sur des sources d'archives inédites et des entretiens avec ses principaux acteurs.

Sur un plan sociologique, l'ouvrage met en lumière l'évolution du rôle des protagonistes du monde nucléaire français, entre promoteurs industriels, experts de sûreté et ingénieurs de l'administration chargés de son contrôle, dans un contexte mouvant où la sensibilité environnementale de l'opinion vient modifier le dialogue traditionnel entre ingénieurs des grands corps.

Cet ouvrage livre ainsi une grande fresque où les acteurs sont aussi bien les neutrons, les grandes agences gouvernementales, les colloques internationaux, que les ingénieurs du Corps des Mines ou les manifestations d'opposants.

Cyrille Foasso est ingénieur de l'INSA de Lyon et docteur en histoire contemporaine de l'université Lumière Lyon II. Il est responsable des collections d'instruments scientifiques et de mécanique au Musée des arts et métiers (Conservatoire national des arts et métiers) à Paris.

Atomes sous surveillance
Une histoire de la sûreté nucléaire
en France



P.I.E. Peter Lang

Bruxelles • Bern • Berlin • Frankfurt am Main • New York • Oxford • Wien

Cyrille Foasso

Atomes sous surveillance
Une histoire de la sûreté nucléaire
en France

« Histoire de l'énergie »
n° 3

Illustration de couverture : Vue de l'avant du réacteur G2, face de chargement (Marcoule, janvier 1962). Archives CEA © CEA/Pierre JAHAN – J 558.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'éditeur ou de ses ayants droit, est illicite.

© P.I.E. PETER LANG S.A.
Éditions scientifiques internationales
Bruxelles, 2012
1 avenue Maurice, B-1050 Bruxelles, Belgique
www.peterlang.com; info@peterlang.com

ISSN 2033-7469
ISBN 978-90-5201-887-4 (paperback)
ISBN 978-3-0352-6224-7 (eBook)
D/2012/5678/71

Ouvrage imprimé en Allemagne

« Die Deutsche Nationalbibliothek » répertorie cette publication dans la « Deutsche Nationalbibliografie » ; les données bibliographiques détaillées sont disponibles sur le site <http://dnb.de>.

*Tant que tu n'as pas traversé la rivière,
n'insulte pas l'alligator*

Proverbe Sango, République centrafricaine
(*Maxi proverbes africains*, Marabout, Presses du Châtelet, 2003)

Table des matières

Préface13

Introduction15

PREMIÈRE PARTIE. L'EMPIRISME DES DÉBUTS DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE (1939-1959)

**CHAPITRE 1. Savants, ingénieurs et médecins :
la sécurité aux débuts de l'énergie atomique (1939-1959)**.....29

- 1.1. Les savants et la sécurité (1932-1945)29
- 1.2. Les débuts du CEA : protection et sécurité par
les techniciens eux-mêmes (1945-1951)37
- 1.3. Première institutionnalisation : la protection.
Médecins et ingénieurs (1951)48
- 1.4. Les ingénieurs, comme monsieur Jourdain... :
la sécurité en marchant.....53

**CHAPITRE 2. Naissance de la sûreté :
les exemples américain et britannique (1957-1959)**71

- 2.1. Les deux premières conférences de Genève.....71
- 2.2. Développement de la sûreté nucléaire
aux États-Unis72
- 2.3. Naissance de la sûreté en Grande-Bretagne90

CHAPITRE 3. Naissance de l'organisation de la sûreté au CEA103

- 3.1. L'enjeu d'une organisation nationale de sûreté
dans le contexte atomique international103
- 3.2. Le rôle des accidents106
- 3.3. Un premier « Groupe d'études »108
- 3.4. Le projet d'organisation de la sûreté au sein du CEA :
la Commission de sûreté des installations atomiques110
- 3.5. La Sous-Commission de sûreté des piles113
- 3.6. Les autres sous-commissions : criticité,
contamination, sites, transport.....122

**DEUXIÈME PARTIE. L'ÉLABORATION D'UNE DOCTRINE ET
L'INSTITUTIONNALISATION DE LA SÛRETÉ EN FRANCE (1960-1970)**

CHAPITRE 4. La Commission de sûreté des installations atomiques (CSIA)	127
4.1. Le rôle de la Commission	127
4.2. L'examen de la sûreté des piles expérimentales	130
4.3. La sûreté des réacteurs de puissance du CEA	143
CHAPITRE 5. Les études de sûreté au CEA	157
5.1. Des études de sûreté pour contribuer à la compétitivité économique de l'énergie atomique	158
5.2. Les études générales de sûreté	160
5.3. Les études de sûreté de la filière graphite	161
5.4. Les études de sûreté de la filière eau lourde-gaz.....	163
5.5. La sûreté des réacteurs à neutrons rapides	166
5.6. Les études de sûreté des réacteurs modérés et refroidis à l'eau ordinaire	170
5.7. Les études de sûreté relatives à l'émission et à la filtration des produits de fission	172
5.8. Évolution de la philosophie des études de sûreté.....	173
CHAPITRE 6. De nouveaux acteurs sur la scène nucléaire française. Un timide début d'incursion de l'administration pour réglementer la sûreté nucléaire	175
6.1. La question des sites : Cadarache.....	175
6.2. Les débuts des rapports entre le CEA et EDF pour la sûreté : EDF1	178
6.3. La CSIA experte pour l'industrie.....	197
6.4. L'incursion des ministères dans le précarré du CEA	209
CHAPITRE 7. Comment évaluer le risque nucléaire ? Cheminements britannique et français vers l'affirmation de philosophies en matière de sûreté.....	219
7.1. La troisième conférence de Genève et les interrogations à propos de l'« accident maximum prévisible ».....	220
7.2. Le colloque de l'Agence de Vienne d'avril 1967.....	222
7.3. Le « dialogue technique » à la française	229

**TROISIÈME PARTIE. LES RÉPERCUSSIONS DU TRANSFERT
DE TECHNOLOGIE DEPUIS LES ÉTATS-UNIS, REDISTRIBUTION DES
RÔLES, CONTINUITÉ DANS LA DOCTRINE DE SÛRETÉ (1970-1979)**

CHAPITRE 8. La mise en place du tripode de la sûreté	235
8.1. La guerre des filières.....	235
8.2. La création du Département de sûreté nucléaire.....	239
8.3. Les « Groupes permanents » d'experts.....	242
8.4. Les Pouvoirs publics et la sûreté nucléaire.....	244
8.5. La création de l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN).....	255
8.6. Conclusion : le tripode de la sûreté.....	258
CHAPITRE 9. Le réacteur à eau sous pression : répercussions d'un transfert de technologie	261
9.1. Constructeurs et architecte.....	261
9.2. Les débats sur la sûreté aux États-Unis.....	273
9.3. Naissance de la réglementation nucléaire en France.....	280
9.4. De nouveaux sites pour le programme nucléaire.....	289
CHAPITRE 10. L'approche probabiliste de la sûreté	305
10.1. L'étude Rasmussen (WASH 1400).....	306
10.2. Les réactions à l'approche probabiliste en France.....	313
CHAPITRE 11. Les études et examens de sûreté au cours de la décennie 1970	325
11.1. Études de sûreté sur les réacteurs à eau légère.....	325
11.2. Études de sûreté des réacteurs à neutrons rapides.....	332
11.3. Une nouvelle branche de l'énergie atomique.....	345

**QUATRIÈME PARTIE. THREE MILE ISLAND,
LA RÉVISION DES CERTITUDES (1979-1986)**

CHAPITRE 12. L'accident de Three Mile Island : le choc	351
12.1. L'accident du 28 mars 1979 à Three Mile Island.....	351
12.2. Les réactions à la suite de l'accident.....	355
12.3. Après l'accident : la philosophie de la sûreté revisitée.....	363
12.4. Bilan de TMI : la rupture ?.....	379

CHAPITRE 13. Le retour d'expérience à l'épreuve des incidents sérieux. La sûreté du parc nucléaire (1979-1986)	381
13.1. L'incident du 13 mars 1980 sur Saint-Laurent A2	381
13.2. Une mauvaise surprise : la découverte des « fissures » ou « défauts sous revêtements »	385
13.3. Problèmes de qualité des fabrications	396
13.4. L'incident de Bugey 5, 15 avril 1984	399

**CINQUIÈME PARTIE. L'EXPLOITATION DES CENTRALES D'EDF
APRÈS TCHERNOBYL : L'AFFIRMATION DU POUVOIR DE
L'ADMINISTRATION CHARGÉE DU CONTRÔLE DE LA SÛRETÉ (1986-2002)**

CHAPITRE 14. L'accident de Tchernobyl et ses conséquences	407
14.1. L'accident	407
14.2. Répercussions de l'accident de Tchernobyl	412
14.3. Les accidents graves réexaminés	419

CHAPITRE 15. Les difficultés rencontrées sur le parc nucléaire d'EDF au cours des années 1989-1992	431
15.1. Les problèmes matériels	432
15.2. Les incidents de maintenance de l'été 1989	449
15.3. Incidents et doutes autour de Phénix et Superphénix	459

CHAPITRE 16. L'autorité de sûreté	465
16.1. Les relations entre l'autorité de sûreté et EDF : le tournant des années 1989-1992	465
16.2. Une nouvelle attitude de l'organisme de contrôle ?	469
16.3. Les griefs d'EDF à l'égard des autorités de sûreté	473
16.4. Une administration qui poursuit l'affirmation de son autorité	483
16.5. Des réformes de structure (1989-2006)	491

Conclusion	497
Remerciements	509
Annexes	511
Sources	523
Bibliographie	527
Index	539

Préface

Le 6 août 1945, la ville d'Hiroshima fut détruite par la première bombe atomique de l'histoire. Il était 8h16 et il faisait beau. Les habitants de la ville vauaient à leurs occupations habituelles. Aucune alerte n'avait été donnée. Seize heures plus tard, la Maison Blanche donnait l'annonce de ce bombardement. Ainsi le monde fut informé que l'énergie nucléaire était effectivement maîtrisée. On était passé des visions du futur à la réalité. Les journaux en répandirent la nouvelle. En France, les quotidiens soulignèrent la prouesse scientifique. Seul Albert Camus, à ma connaissance, prit ses distances en s'interrogeant sur les conséquences de cet événement. Pouvait-on faire l'éloge d'une découverte si terrible ? se demandait l'écrivain. Et il ajoutait : « Il va falloir choisir, dans un avenir plus ou moins proche, entre le suicide collectif ou l'utilisation intelligente des conquêtes scientifiques ».

L'année 1954 marque une autre étape. Le président Eisenhower inaugure le premier sous-marin à propulsion nucléaire. Deux ans plus tard, à Marcoule, une première expérience sur ce que sera la filière française de production d'énergie électronucléaire – la filière graphite-gaz abandonnée depuis – est réalisée.

Le 4 octobre 1957, une fusée soviétique met en orbite le premier satellite, le Spoutnik. Preuve est faite que des fusées peuvent parcourir des centaines de kilomètres et porter des bombes nucléaires sur des cibles précises. On est en pleine guerre froide et les conséquences de ces trois événements ont été largement étudiées par les historiens. On peut dire qu'en 1957 le décor est planté et la peur d'une éventuelle destruction totale de l'Humanité va de pair avec l'illusion que l'on disposera *ad libitum* d'une énergie bon marché.

Doit-on s'étonner si l'une des premières réflexions sur le lien science atomique/société ait été publiée à ce moment ? En 1958 le philosophe allemand Karl Jaspers publie *La bombe atomique et l'avenir de l'homme*, traduit en français en 1963. Le public français peut lire les considérations de Jaspers alors que le 1^{er} mai 1962, lors du deuxième essai de la bombe nucléaire française, un nuage radioactif s'était échappé de la galerie de tir. C'est l'accident de Béryl, du nom de code de l'essai. Peu de temps après, en octobre, le monde entier retiendra son souffle lors de la crise des missiles de Cuba

Jaspers fait une analyse de l'état du monde du point de vue politique et éthique. Il se demande en conclusion : « On voudrait bien savoir si d'ici cent ans, et même avant, l'humanité sera anéantie ; n'y aura-t-il plus de vie humaine ? Ou bien l'énergie atomique sera-t-elle domptée et servira-t-elle l'homme, sinon sans danger, au moins sans risque de

catastrophe totale ? La bombe atomique disparaîtra-t-elle ? » Et il poursuivait un peu plus loin : « Qu'il fasse ce qu'il peut pour trouver les voies de son existence à des conditions qui montrent qu'il la domine ; qu'il comprenne pourquoi son entendement peut sans doute imaginer les possibilités négatives, présager disparition et destruction, même les prédire comme probables pour lui... »

Les ingénieurs français ont-ils lu l'interrogation de ce philosophe ? Eux qui, encore marqués par une philosophie positiviste, croyaient fermement au progrès et voyaient la technique comme apportant la solution aux problèmes de l'humanité ? Difficile d'apporter une réponse à cette question. Ce qui par contre est certain est que l'accident de la centrale nucléaire de Three Mile Island (28 mars 1979), classé *a posteriori* au niveau 5 de l'échelle internationale des événements nucléaires qui compte 7 niveaux, ensuite, et plus graves encore, l'accident de Tchernobyl en 1986 qui a atteint 100 fois le seuil de déclenchement du niveau 7, et enfin celui de Fukushima qui a été classé lui aussi à l'échelle 7, ont amené le public à s'interroger sur un éventuel accident en France.

Le travail de Cyrille Foasso répond à la question de l'attitude des ingénieurs en France et à l'étranger face à l'éventualité d'un accident majeur dans l'énergie nucléaire civile. Il est rare que l'on puisse suivre l'évolution du regard des ingénieurs par rapport à leur évaluation de ce qu'ils sont en train de faire. Cyrille Foasso a eu la possibilité non seulement de consulter les archives sur la question, mais aussi d'interroger les acteurs de cette évolution sur plusieurs années. Il est fort probable que si un ingénieur ayant exercé son métier dans les années 1950 du siècle dernier lisait ce travail, il ne reconnaîtrait pas ce qu'est devenue sa discipline et cette nouvelle manière de traiter le problème, qui prend explicitement en compte la probabilité d'accident, jamais égale à zéro. Mais pouvait-il en être autrement alors que la demande de la société était forte et aiguisée par les accidents divers ? Que l'on pense à l'alerte lancée par le film le « Syndrome chinois » sorti simultanément dans plus de six cents salles de cinéma quelques jours avant l'accident de Three Mile Island.

Cyrille Foasso a le profil de l'historien en mesure de traiter avec compétence cette question de la sécurité et de la sûreté des centrales nucléaires. Ingénieur, il s'est formé à l'histoire et a soutenu une thèse sur ce sujet à l'Université LyonII-Lumière. Aujourd'hui, ce travail qui a été favorablement accueilli par le jury est publié dans une forme plus condensée. J'espère qu'il ouvrira un débat non seulement sur le nucléaire, mais sur la formation des ingénieurs. Ce serait le signe certain que le sujet peut nourrir le débat sur les liens science, technique société.

Girolamo RAMUNNI, Professeur au Conservatoire national des arts et métiers

Paris, le 25 janvier 2012

Introduction

Au tout début du mois de janvier 1939, Otto Hahn et Fritz Strassman de Berlin découvrent la fission de l'atome. Quatre ans plus tard, le 2 décembre 1942, Enrico Fermi et ses collègues de l'Université de Chicago parviennent à réaliser la première réaction en chaîne contrôlée. De nos jours, près des quatre cinquièmes de l'électricité sont produits en France grâce à des installations utilisant le principe de la fission. Pourtant, dès l'origine, les dangers inhérents à ce phénomène étaient connus des scientifiques : le potentiel explosif allait être utilisé pour construire des bombes d'une puissance inégalée tandis que la construction des piles atomiques allait s'entourer de grandes précautions. Rarement sans doute dans l'histoire une technique aura connu un développement aussi fulgurant, mais rarement également elle aura été l'objet d'autant de critiques et d'oppositions. C'est l'histoire des mesures prises pour maîtriser les risques de cette source d'énergie qui est l'objet de cet ouvrage.¹

Sécurité et histoire des techniques

L'histoire de ce que scientifiques et ingénieurs appelleront à partir de 1960 la « sûreté nucléaire » s'insère dans le cadre d'une réflexion plus vaste sur la sécurité dans l'histoire des techniques : en quoi offre-t-elle un moyen de comprendre à la fois la technique et la société, ainsi que leurs influences réciproques ? Le concept de sécurité des objets et systèmes techniques constitue l'interface idéale entre la gestion du progrès scientifico-technique et l'évolution de la société dans son ensemble. Il fait le lien entre les préoccupations journalières de la communauté des ingénieurs qui mettent au point ces « objets », et le reste de la société qui en dispose, mais en subit parfois aussi les conséquences. Ces objets/systèmes techniques façonnent notre société, mais ils en sont également le produit, le reflet.

Ce thème de « sécurité et technique », peu traité au plan historique, s'est pourtant hissé au cœur des préoccupations de nos sociétés. Le développement de la société industrielle avec l'apparition des complexes

¹ Cet ouvrage est issu d'une thèse de doctorat d'histoire moderne soutenue à l'université Lumière Lyon 2 en 2003 et intitulée « Histoire de la sûreté de l'énergie nucléaire civile en France : technique d'ingénieur, processus d'expertise, question de société », de 1 003 pages. Afin de ne pas alourdir la lecture du présent ouvrage, seules les références essentielles du texte de la thèse ont été conservées.

chimiques, pétroliers, nucléaires, biotechnologiques, avec l'accroissement des problèmes de stockage, de transport comme d'élimination de matières dangereuses montre que la technique est aussi source de nuisances, porteuse de risques majeurs, comme l'ont prouvé les catastrophes de Bhopal, Seveso, Tchernobyl, ou encore Fukushima, pour ne citer que certaines des plus marquantes. La sécurité des systèmes techniques et la prévention des accidents sont aujourd'hui un problème essentiel, aux yeux des populations, des industriels et des pouvoirs publics.

Le choix de l'électronucléaire comme objet d'étude était d'autant plus indiqué que, outre son potentiel de danger considérable, la sécurité avait été une priorité affichée dès le début par les scientifiques qui développèrent cette nouvelle forme d'énergie.

Notre premier objectif, internaliste, était de comprendre comment les scientifiques puis les ingénieurs ont élaboré les principes, les moyens techniques visant à maîtriser ce risque, en essayant de distinguer l'importance respective des théories, des règles de l'art, des expériences, des prototypes, des modèles, des simulations, dans l'arsenal dont disposent tout d'abord les concepteurs, les constructeurs puis les exploitants qui font fonctionner les installations au quotidien. La question posée était de savoir comment, malgré une connaissance non exhaustive des phénomènes, les ingénieurs parviennent à fabriquer un système technique qui fonctionne, et ainsi de tenter d'approcher l'une des particularités du savoir des ingénieurs.

Un deuxième objectif qui constitue sans doute la nouveauté de cette étude est de montrer le point de vue des ingénieurs. Car la sûreté n'est pas qu'une question de rapports de force entre acteurs, mais c'est avant tout une question technique, dont les ingénieurs sont les premiers à se préoccuper, dans le temps, mais aussi par « intérêt » : ils ne construisent pas une machine pour qu'elle explose mais pour qu'elle fonctionne le mieux possible ! Nous avons cherché à comprendre comment, au sein même de la communauté des développeurs du nucléaire, la question de la sûreté a été appréhendée : alors que l'accent est souvent mis sur le rôle du contexte extérieur, nous montrons les enjeux, les oppositions qui ont existé entre les ingénieurs du nucléaire du fait de la distinction des rôles qui s'est opérée entre développeurs et contrôleurs. Nous examinons aussi comment les préoccupations de sûreté des ingénieurs ont été influencées par les enjeux du développement de cette énergie, comment les modalités de l'expertise de la sûreté se sont modifiées, en particulier avec le changement d'échelle entre le travail de laboratoire et le programme industriel. Notre intention était de cerner ce que pouvait avoir de spécifique la démarche adoptée en France pour l'expertise de la sûreté, alors que le développement de cette forme d'énergie est concomitant dans différents pays. Par ailleurs, il paraissait intéressant de voir

comment la sensibilité naissante de l'opinion vis-à-vis des impacts du développement technologique sur l'environnement à partir des années 1970 allait, ou non, modifier la perception des questions de sécurité dans le monde des techniciens.

La problématique

La problématique autour de la maîtrise du risque nucléaire peut être résumée par deux questions principales, l'une à caractère technique, l'autre plus politique. Comment décider ? Qui décide ?

Sur le plan technique, pour décider si une installation est sûre, le technicien doit élaborer une doctrine et des moyens de jugement, face au risque majeur mais aussi face aux pollutions en fonctionnement normal. La palette des risques est en effet vaste, allant du plus faible au plus catastrophique, du plus probable au plus hypothétique. Tant au niveau de la conception qu'à celui de l'analyse, le problème soulevé était de savoir « que prendre en compte, jusqu'où prendre en compte ? » La démarche s'est progressivement dédoublée : dans un premier temps, il a fallu trouver les moyens de prévenir les accidents par des procédés techniques et une philosophie de la conception ; en second lieu, il s'est agi d'inventer une démarche pour vérifier que dans la première étape on n'avait laissé qu'un risque résiduel, qu'aucune faille n'était présente dans les concepts et les moyens mis en œuvre. L'exemple du risque majeur est révélateur de ce questionnement, que ce soit au niveau des projets ou de l'analyse de la sûreté : des mesures sont prises pour que les accidents aux conséquences catastrophiques soient les plus improbables, mais jusqu'où doit-on multiplier les hypothèses sur les scénarios d'accidents ? Quels sont les seuils au-delà desquels les mesures de sûreté ne se justifient plus, sachant que la prévention de tels événements a nécessairement un coût qui va croissant pour un bénéfice marginal en termes de réduction des risques ? À partir de quel moment estime-t-on qu'on est raisonnablement protégé contre les accidents les plus graves ? Autrement dit, quel est le niveau de prévention raisonnable, et comment savoir si on a atteint le niveau souhaité ? Ces questions se sont posées pour une technologie en plein développement et dont les promoteurs ne voulaient pas faire l'apprentissage par essais-erreurs. Il a fallu trouver des méthodes de jugement, de décision, alors que les données scientifiques et techniques n'étaient encore qu'approximatives.

Si la sûreté est un problème technique géré par des spécialistes, l'acceptabilité du risque pose la question de « qui décide ? » La problématique de l'expertise et de la décision est éminemment politique. Le jugement sur la sûreté dépend du contexte politique, des rapports entre acteurs (industriels, experts, administration, pouvoir politique, opinion publique), c'est pourquoi l'analyse des institutions est fondamentale. La

compétence technique justifie-t-elle le pouvoir de décision du niveau de sûreté adéquat ? Dans un monde où la technique joue un rôle croissant, quels types de rapports s'instaurent entre science et société, entre les élites scientifiques et l'opinion publique ? Sur le fond, les questions de sûreté ne sont jamais purement scientifiques ou techniques : il est toujours nécessaire d'arbitrer par exemple entre le coût des mesures de sûreté supplémentaires et la nécessité de fonctionnement à un coût raisonnable. Qui doit arbitrer ? Une question spécifique en France est de savoir si la sûreté a ou non souffert d'être gérée par des instances qui œuvraient dans le même temps à la promotion de l'énergie atomique.

Cet ouvrage se présente ainsi comme une étude de cas qui relate comment s'est posée et comment s'est construite au fil du temps la réponse à la question de l'expertise et du contrôle de la sûreté dans le domaine électronucléaire français entre le « comment décider » et « qui décide ».

Limites de l'étude, état des lieux de la littérature

L'énergie nucléaire est un domaine qui a fait l'objet de nombreuses études. Le présent travail a laissé de côté les aspects militaires et s'est limité à l'énergie nucléaire civile, et plus particulièrement aux centrales nucléaires productrices d'électricité. Les aspects touchant à la recherche des matières premières, à la fabrication du combustible ou encore au traitement des déchets sortent du cadre de cette étude même s'ils sont parfois évoqués car ils conditionnent les modes de raisonnement sur la machine elle-même, ou façonnent le contexte plus général du développement de l'énergie nucléaire. L'histoire de la radioactivité et des polémiques autour de sa nocivité en fonction des doses n'est également évoquée que partiellement et à certains moments clés, tout comme l'évolution du traitement des « agressions externes » comme les inondations ou les séismes, si importants pour la sûreté, mais communs à d'autres technologies à risque.

La littérature concernant l'énergie nucléaire est abondante. Quelques ouvrages traitent des relations internationales et stratégiques.² Les aspects économiques du développement de cette technologie ont été largement étudiés. La compétitivité de l'énergie nucléaire face aux autres formes d'énergie, le choix de tel ou tel type de réacteurs nucléaires, les rivalités à propos de ces filières, les styles de promotion de l'énergie

² Goldschmidt, Bertrand, *L'aventure atomique, ses aspects politiques et techniques*, Fayard, 1962 ; Goldschmidt, Bertrand, *Les rivalités atomiques, 1939-1966*, Fayard, Paris, 1967 ; Goldschmidt, Bertrand, *Le complexe atomique, Histoire politique de l'énergie nucléaire*, Paris, Fayard, 1980 ; Pringle, P., Spigelman, J., *Les barons de l'atome*, Paris, Seuil, 1982.

atomique par les différents États ont fait l'objet de nombreuses publications.³ Les aspects industriels du développement de l'énergie nucléaire ont été relatés par d'anciens acteurs ou par des analystes.⁴ L'opposition à l'énergie nucléaire au cours des années 1970 a inspiré de nombreux auteurs, parfois très polémiques. Des universitaires se sont attachés à analyser la nature de ces mouvements.⁵

En revanche, les milieux universitaires français ne se sont pas penchés sur la sûreté nucléaire, et encore moins sur sa réalité technique, sa mise en œuvre, son histoire, ses enjeux, à la différence des États-Unis, où il existe une vaste historiographie de l'énergie nucléaire et de sa sûreté, en particulier grâce à l'histoire officielle de l'AEC et de la NRC.⁶

³ Bupp, Irvin C., Derian, J.-C., *Light Water. How the Nuclear Dream Dissolved*, New York, Basic Books, 1978 ; Finon, Dominique, *Les États face à la grande technologie dans le domaine civil. Le cas des programmes surgénérateurs*, Thèse pour le Doctorat d'État ès sciences économiques, soutenue le 18 mars 1988 ; Jasper, James M., *Nuclear Politics. Energy and the State in the United States, Sweden, and France*, Princeton, Princeton University Press, 1990 ; Hecht, Gabrielle, *The Radiances of France*, Cambridge, The MIT Press, 1998.

⁴ Lamiral, Georges, *Chronique de trente années d'équipement nucléaire à Électricité de France*, Paris, AHEF, 1988 ; Larroque, Dominique, *Histoire du service de la production thermique d'Électricité de France. Le temps du nucléaire*, Tome second, 1973-1992, Paris, AHEF, 1999 ; Picard, Jean-François, *Recherche et Industrie. Témoignages sur quarante ans d'études et recherches à Électricité de France*, Paris, Eyrolles, 1987 ; Picard, J.-F., Beltran, A., Bungener, M., *Histoire(s) de l'EDF*, Paris, Dunod, 1985. D'autres ouvrages écrits par de grands acteurs d'EDF ou du CEA, plus à destination du grand public, dressent un panorama de l'histoire de l'énergie nucléaire, vue des promoteurs : Cf. Leclercq, Jacques, *L'ère nucléaire*, Hachette, Paris, 1986 ; L'ouvrage rédigé sous la direction de P.-M. de la Gorce, *L'aventure de l'atome*, Flammarion, Paris, 1992, fait appel à des contributions de pionniers au CEA comme Pierre Bacher, Jean Bourgeois ou Jean Bussac.

⁵ Nelkin, D., Pollack, M., *The Atom Besieged : Extra-Parliamentary Dissent in France and Germany*, Cambridge, Mass., MIT Press, 1980 ; Touraine, A., Hegedus, Z., Dubet, F., Wiewiorka, M., *La prophétie antinucléaire*, Paris, Seuil, 1980 ; Fagnani, F., Nicolon, A., *Nucleopolis. Matériaux pour l'analyse d'une société nucléaire*, Grenoble, Presses universitaires de Grenoble, 1979. À côté d'une multitude de pamphlets critiques ou apologistes de l'énergie atomique, parus essentiellement au cours des années 1970, le livre de deux physiciens critiques à l'égard de l'énergie atomique, procure de saisissantes descriptions des accidents nucléaires : Pharabod, J.-P., Schapira, J.-P., *Les jeux de l'atome et du hasard*, Paris, Calmann-Lévy, 1988.

⁶ Hewlett, Richard G., Anderson, Oscar E., *The New World, 1939-1946 : Volume I of a History of the United States Atomic Energy Commission*, The Pennsylvania State University Press, 1962 ; Hewlett, Richard G., Duncan, Francis, *Atomic Shield, 1957-1952 : Volume II of A History of the United States Atomic Energy Commission*, The Pennsylvania State University Press, 1969 ; Mazuzan, George T., Walker, Samuel J., *Controlling the Atom : The Beginnings of Nuclear Regulation, 1946-1962*, Berkeley, University of California Press, 1984 ; Walker, Samuel J., *Containing the Atom. Nuclear Regulation in a Changing Environment, 1963-1971*, Berkeley, University of California Press, 1992.

Pour sa part, l'un des grands experts américains de la sûreté a publié un ouvrage essentiel pour comprendre les débats, et ils ont été nombreux, qui ont eu lieu entre les protagonistes américains.⁷ En Angleterre également, l'histoire officielle de la UKAEA offre de nombreuses informations, moins ciblées il est vrai sur les aspects sûreté.⁸ En France, un ouvrage a été écrit par les « pères » de la sûreté au CEA.⁹ Il donne les principaux jalons de l'évolution de la sûreté en France et dans le monde tout en exposant la foi des auteurs dans le fait que « l'énergie nucléaire, bien gérée, est le procédé le plus sûr aujourd'hui pour produire de l'électricité. » S'il explique le fonctionnement du contrôle, il ne relate pas les débats, les controverses autour de la gestion de la sûreté en France. Un essai de sociologie, non publié, retrace l'émergence des institutions chargées du contrôle de la sûreté nucléaire en France.¹⁰

Les thèmes

Retracer l'évolution de la sûreté nucléaire au cours du second XX^e siècle implique une nécessaire « histoire technique des techniques ». L'un des objectifs de cette étude est d'aborder l'histoire de la sûreté en parlant aussi de la technique, de montrer de l'intérieur quels problèmes se posent, comment ils sont appréhendés, en évoquant les doutes, les questionnements provenant des problèmes techniques eux-mêmes. On souhaiterait que le lecteur assiste à l'activité des ingénieurs qui conçoivent, construisent, exploitent et analysent le fonctionnement global de la machine. On se place pour une grande part du point de vue des techniciens, mais moins du point de vue des spécialistes que de celui des généralistes : faire l'histoire ne serait-ce que d'une des multiples spécialités qui sont au cœur du fonctionnement d'une centrale nucléaire, par exemple la mécanique de la rupture, les contrôles non destructifs ou la thermohydraulique, nécessiterait sans doute un ouvrage entier consacré à chaque thème. Certains spécialistes resteront sans doute « sur leur

⁷ Okrent, David, *Nuclear Reactor Safety. On the History of the Regulatory Process*, Madison, The University of Wisconsin Press, 1981. Ou encore l'ouvrage d'un universitaire : Balogh, Brian, *Chain Reaction. Expert debate and public participation in american commercial Nuclear power, 1945-1975*, Cambridge, Cambridge University Press, 1991.

⁸ Gowing, Margaret, *Britain and Atomic Energy 1939-1945*, London, Macmillan, 1964 ; Gowing, Margaret, *Independence and Deterrence – Britain and Atomic Energy, 1945-1952*, 2 vols., London, Macmillan, 1974.

⁹ Bourgeois, J., Tanguy, P., Cogné, F., Petit, J., *La sûreté nucléaire en France et dans le monde*, Paris, Polytechnica, 1996.

¹⁰ Vallet, Bénédicte, *The Nuclear Safety Institution in France : Emergence and Development*, A dissertation in the Department of Sociology for the Degree of Doctor of Philosophy at New York University, June 1986.

faim », d'autres lecteurs trouveront peut-être que les aspects techniques sont trop approfondis. Nous avons essayé de ne retenir des questions techniques que celles qui éclairent le fonctionnement d'ensemble d'une centrale et qui permettent de comprendre les enjeux des discussions de sûreté.

Une analyse sociologique, politique, est fondamentale pour comprendre les enjeux de la sûreté nucléaire. Mais on ne peut traiter sérieusement la question sans une certaine immersion dans les questions techniques, parfois pointues. La sûreté, c'est avant tout le fonctionnement intime de la machine, qui plus est d'une machine complexe. Cependant, cette étude n'est pas un exposé technique sur le fonctionnement d'une centrale nucléaire ni sur les techniques de contrôle de sa sûreté. Ce n'est pas un cours technique. À la différence de ce type d'exposés ou de cours de sciences présentant une vérité qui apparaît immuable au moment où elle est enseignée (alors qu'elle évolue dans le temps d'un cours à l'autre), c'est l'évolution des conceptions, des motifs, des acteurs qui est remise en perspective. Cette approche doit permettre une juste intelligence des outils techniques et de leur développement.

L'histoire de la sûreté nucléaire est également l'histoire d'organisations industrielles, comme Électricité de France ou Framatome, une histoire industrielle et managériale, une histoire sociale. C'est aussi l'histoire d'une institution scientifique et technique, le Commissariat à l'Énergie Atomique où l'on assiste à la genèse d'une science, de techniques, d'un corps de doctrine, de profils individuels. Car cette histoire est celle d'ingénieurs : leur histoire est très souvent une histoire collective, l'histoire des institutions qui les ont accueillis ou qu'ils ont mises sur pied. Même si quelques personnalités jouent un rôle plus éminent, les destins d'ingénieurs sont rarement étudiés. Il existe certes des biographies des grands scientifiques (Joliot), mais l'histoire des ingénieurs souffre encore de grosses lacunes. Les destins de certains grands bâtisseurs ou administrateurs (Dautry, Guillaumat)¹¹ ont été retracés, mais on connaît moins bien les « chevilles ouvrières » qui ont été à l'œuvre, par exemple dans la sûreté nucléaire.

C'est une histoire administrative enfin, en particulier de l'institution d'un service au sein du ministère de l'industrie (dont l'histoire reste à faire), confié au Corps des ingénieurs des Mines.

¹¹ Baudouï, Rémi, *Raoul Dautry, 1880-1951. Le technocrate de la République*, Paris, Balland, 1992 ; Beltran, A., Soutou, G.-H. (dir.), *Pierre Guillaumat, la passion des grands projets industriels*, Paris, Rive droite, 1994 ; Pinault, Michel, *Frédéric Joliot-Curie*, Paris, Odile Jacob, 2000.

Une telle histoire est nécessairement internationale et comparative. Si les premiers développements de l'énergie nucléaire industrielle se sont déroulés dans un contexte de compétition entre nations et sous le sceau du secret, dès les années 1950, les idées en matière de sûreté émises dans certains pays font l'objet de discussions lors de congrès internationaux. Outre le récit des influences américaine, britannique, canadienne sur les conceptions françaises, et au-delà des transferts de technologie, la comparaison avec les débats de sûreté à l'étranger permet d'illustrer ce qu'a de particulier le système français.

Présentation des différents chapitres

Les quelque soixante années que compte l'énergie nucléaire industrielle sont marquées par de grandes ruptures soit au niveau des conceptions en matière de sûreté, soit dans l'organisation de son contrôle. Les observateurs s'accordent généralement sur ces différentes périodes d'une durée d'une dizaine d'années chacune environ. Ce sont souvent plusieurs faits qui distinguent la fin d'une période ou le début de la suivante, que ce soit au niveau des phases du développement technique et industriel, au niveau des ruptures conceptuelles, de l'institutionnalisation de la sûreté, ou d'événements marquants comme les accidents.

La première partie de l'étude aborde les premiers pas de l'épopée atomique depuis les découvertes de la physique au début du XX^e siècle jusqu'à l'année 1959 où l'on prend conscience au CEA de la nécessité de mettre sur pied une structure spéciale chargée d'examiner ce qu'on appelle désormais la « sûreté » des différentes installations du Commissariat. Le chapitre 1 relate ainsi en préambule la découverte de la radioactivité et de ses dangers par les savants. À la suite de la découverte de la fission, l'équipe Joliot dépose en 1939 une série de brevets où sont envisagés les moyens de tirer parti de la fission du noyau pour produire de l'énergie sous forme explosive ou contrôlée. Le développement et la construction des premières piles atomiques nécessitent l'intervention d'une nouvelle catégorie professionnelle, les ingénieurs, basée sur une nouvelle science, la neutronique. Ceux-ci montent en puissance à mesure du développement d'un vaste programme militaro-industriel. Suivant les exemples américain et britannique (chapitre 2) où l'on commence à s'interroger sur les pires conséquences envisageables d'un accident de réacteur, la fin de la décennie cinquante voit la création en France d'une structure chargée d'examiner la sûreté des installations atomiques au sein du CEA et présidée par le haut-commissaire, la Commission de sûreté des installations atomiques (CSIA) (chapitre 3).

La deuxième partie relate principalement les activités de la Commission de sûreté du CEA au cours des années 1960. Comme lors de séances d'un tribunal, on assiste à l'examen de la sûreté des piles du

CEA où différents points de vue s'affrontent au sein même du Commissariat (chapitre 4) : point de vue des exploitants des piles de puissance, point de vue de la Sous-Commission de sûreté des piles et de son noyau d'ingénieurs dont la sûreté est devenue la tâche exclusive, point de vue des constructeurs, des métallurgistes, etc. La division des tâches se traduit également par le lancement d'études et de recherches consacrées à la seule sûreté, dont l'enjeu affiché est, tout en faisant progresser la sûreté, de rendre cette nouvelle forme d'énergie compétitive, grâce à une meilleure compréhension des phénomènes physiques en jeu, en autorisant notamment une réduction des marges de sécurité prises initialement de façon conservatrice alors que ces phénomènes étaient mal connus (chapitre 5). Seul organisme expert au cours de cette période, la Commission de sûreté du CEA est amenée à juger la sûreté des installations atomiques d'autres institutions, et en particulier d'EDF qui fait ses premiers pas dans l'énergie atomique. Malgré un premier décret en décembre 1963 qui instaure une procédure visant à réglementer les créations des installations nucléaires, la CSIA reste l'expert de la sûreté (chapitre 6). Le chapitre 7 clôt cette seconde partie en montrant un début d'affirmation d'une position française en matière de sûreté nucléaire, distincte de celle des États-Unis et de l'Angleterre, en particulier sur la question des accidents graves qui doivent être envisagés et sur la sélection des sites susceptibles de recevoir des installations atomiques.

La troisième période (1967-1979) s'ouvre avec l'épisode de la « guerre des filières » ayant opposé le CEA, défenseur de la filière à Uranium Naturel Graphite Gaz (UNGG), et Électricité de France, de plus en plus attirée par la filière PWR (Pressurized Water Reactor) développée aux États-Unis. La victoire d'EDF aura d'importantes conséquences, en particulier pour la sûreté : ce sont des pans entiers du CEA qui se retrouvent sans activité et une partie de ces éminents techniciens va désormais se consacrer exclusivement à la sûreté. Cette période voit l'émergence, selon un schéma conçu par les plus hautes autorités du CEA, du « tripode de la sûreté » qui caractérise la structure du contrôle de la sûreté nucléaire en France : d'un côté l'industriel qui exploite une installation, de l'autre l'autorité administrative, et enfin un organisme d'expertise (chapitre 8). En effet, à partir de 1973, c'est le Service des mines qui est chargé d'organiser pour le compte des pouvoirs publics le contrôle de la sûreté nucléaire grâce à un Service central de la sûreté des installations nucléaires, au ministère chargé de l'industrie. 1976 voit la naissance d'un Institut de protection et de sûreté nucléaire, au sein du CEA, chargé de l'expertise à la fois des questions de protection (question à caractère plus médical) et de la sûreté (plus du ressort des ingénieurs). Le chapitre 9 relate les modalités du transfert de la technologie PWR par EDF, qui tout comme le CEA ou les pouvoirs publics, doivent se mettre à « l'heure américaine », car ce sont également les règles et

pratiques de sûreté qu'il s'agit d'adapter au contexte industriel et administratif français. Le lancement d'un vaste plan d'équipement nucléaire au milieu des années 1970 pose avec une acuité nouvelle la question de la sélection des sites, autour desquels se cristallise la contestation anti-nucléaire naissante. Nous montrons comment les diverses parties s'affrontent autour de ces questions, le jeu du pouvoir gouvernemental qui découvre l'opposition larvée d'une partie des administrations locales aux volontés d'EDF, la mise en place de critères de sélection des sites par les experts et leur opposition discrète mais résolue au choix de certains d'entre eux. Le chapitre 10 retrace quant à lui l'un des bouleversements conceptuels en matière de sûreté et des conflits qu'il a suscités, autour de ce que l'on a appelé « l'approche probabiliste » de la sûreté. Le chapitre 11 relate l'évolution des études de sûreté au cours des années 1970. Pour les réacteurs à eau pressurisée, les débats tournent autour de la vraisemblance de différents scénarios accidentels considérés jusque-là comme peu probables : la fusion du cœur ou la rupture de la cuve. Pour les réacteurs à neutrons rapides, les études de sûreté sont d'autant plus cruciales pour les hommes du CEA qu'ils ne désespèrent pas que cette filière constituera l'un des axes d'avenir de l'énergie nucléaire en France et dans le monde.

L'accident de la centrale nucléaire de Three Mile Island en mars 1979 aux États-Unis ouvre une période de remise en cause. Le chapitre 12 s'attache tout d'abord à rappeler le contexte industriel et psychologique des milieux nucléaires français à la veille de l'accident : alors que des séries de tranches nucléaires sont sur le point de démarrer en rafale, que le programme d'équipement nucléaire est présenté par les plus hautes autorités gouvernementales comme une question vitale pour la nation, des discussions vives opposent les partenaires à propos du coût des mesures de sûreté dont une partie des protagonistes envisagent le renforcement alors que d'autres estiment que celles-ci sont amplement suffisantes eu égard aux efforts consentis dans d'autres activités industrielles. Ces conflits, comme ceux avec les opposants, étant plus ou moins achevés à la fin de la décennie, le ciel semble se découvrir pour un développement plus serein de l'énergie nucléaire : confortés par les prévisions probabilistes, les promoteurs peuvent avoir le sentiment que le risque d'accident est maîtrisé, quand se produit l'accident de Three Mile Island. L'improbable est survenu, provoquant en interne une profonde remise en cause des pratiques de l'industrie nucléaire et la prise en compte de certains accidents graves considérés jusque-là comme hypothétiques, mais aussi une réévaluation du rôle dévolu à l'homme dans la conduite d'installations techniques complexes. Le chapitre 13 s'attache à montrer les enseignements tirés des premières années de fonctionnement du parc électronucléaire français, ce « retour d'expérience » d'exploitation, principale leçon tirée de l'accident américain. C'est l'occa-

sion d'analyser à la lumière des incidents qui se produisent comment fonctionne le système de contrôle de la sûreté nucléaire, c'est-à-dire les questions techniques autour desquelles se révèlent les pouvoirs de chacun des trois acteurs, tous plus ou moins dépendants du ministère de l'Industrie.

La dernière période est à nouveau introduite par un accident, celui de Tchernobyl en avril 1986 (chapitre 14). Si les leçons tirées pour le parc électronucléaire français semblent de prime abord moins importantes qu'après Three Mile Island, les années qui suivent l'accident en Ukraine voient le déplacement du consensus entre experts dans le sens d'un approfondissement de la prise en compte des « accidents graves » pouvant conduire à la fusion du cœur, question notamment évoquée par la contre-expertise commanditée par le Conseil régional du Haut-Rhin lors de la première visite décennale de Fessenheim. Plus durablement, l'accident de Tchernobyl ouvre une ère où les relations deviennent plus tendues entre l'exploitant EDF et l'autorité administrative chargée du contrôle de la sûreté. Un certain nombre de difficiles questions techniques (chapitre 15) affectent l'ensemble du parc alors que l'opinion s'interroge fortement sur les risques du nucléaire. Le dernier chapitre (chapitre 16) montre le renforcement du pouvoir administratif de contrôle sur les activités nucléaires, dans un contexte d'internationalisation croissante des questions de sûreté. C'est l'aptitude d'un service de l'État à contrôler au nom du public des industries à risque qui est mise en doute, alors que plus généralement l'État apparaît discrédité aux yeux de cette opinion, mais aussi le rôle dévolu aux experts comme détenteurs exclusifs d'un savoir et la neutralité de leur position.

La sûreté nucléaire a une histoire. Les principes, les moyens techniques mis en œuvre, les structures de contrôle sont une construction qui s'est élaborée au fil du temps en fonction d'exigences internes au monde technique, mais toujours sous la pression plus ou moins forte de l'environnement sociétal : ce sont ces évolutions que nous nous proposons de retracer.

PREMIÈRE PARTIE

**L'EMPIRISME DES DÉBUTS DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE
(1939-1959)**

CHAPITRE 1

Savants, ingénieurs et médecins : la sécurité aux débuts de l'énergie atomique (1939-1959)

Au cours des vingt ans qui s'écourent à partir de la compréhension du principe de la réaction en chaîne, l'autarcie et la course aux réalisations dominent la construction des premières installations atomiques. Cette période voit les savants physiciens pionniers de l'énergie atomique passer le relais aux ingénieurs, dans un cadre où le principal danger de l'atome – la radioactivité – est identifié et géré par les médecins. Ce développement prodigieux de l'énergie atomique va poser de nouvelles exigences en matière de gestion du risque radioactif, qui ne seront que progressivement perçues par ces différentes identités professionnelles.

1.1 Les savants et la sécurité (1932-1945)

1.1.1. La radioactivité ; la réaction en chaîne

Les débuts du XX^e siècle ont connu une accélération des avancées en physique bouleversant la compréhension de la constitution de la matière, à la suite de la découverte des rayons X par Wilhelm Röntgen fin 1895. Henri Becquerel montre l'année suivante que des sels d'uranium émettent des rayonnements, mettant en évidence ce que Marie Curie qualifierait deux ans plus tard de radioactivité.

Rapidement les scientifiques constatent que ces rayonnements produisent des effets sur l'homme et qu'ils peuvent être utilisés pour traiter les cancers ; ceci allait conduire au développement d'une nouvelle discipline médicale, la radiothérapie. Mise en œuvre sans les précautions adaptées, les premiers accidents cutanés sont observés quelques mois plus tard : l'exposition aux radiations pouvait provoquer de sérieux problèmes de santé allant de l'irritation cutanée à la perte des cheveux, à la stérilité et jusqu'au cancer. Des règles de protection contre les rayonnements durent être élaborées, donnant naissance à une discipline à cheval sur la médecine et la physique : la radioprotection.

Une Commission internationale de protection contre les rayons X et le radium, créée en 1928 lors du deuxième congrès international de

radiologie à Stockholm, publie ses premières recommandations l'année suivante.¹

Si les dangers de la radioactivité sont reconnus par les médecins au début des années 1930, le domaine de la physique va faire émerger au cours de la décennie les principes conduisant à la production d'énergie d'origine atomique. Cette période est marquée par une forte émulation entre les équipes de physiciens de différents pays et les découvertes se succèdent, pressenties par les uns, annoncées par les autres, devançant d'autres encore de quelques jours, ou tirant les conclusions de précédentes publications.

En février 1932, James Chadwick annonce la découverte d'une nouvelle particule, le neutron. Quelques mois plus tard, en janvier 1934, Frédéric Joliot et Irène Curie sont en mesure d'annoncer la mise en évidence de la radioactivité artificielle. Utilisant les neutrons pour bombarder différentes substances et observer la transmutation des atomes, Enrico Fermi découvre qu'en bombardant l'uranium, ce sont non seulement un mais plusieurs éléments nouveaux qui se comportent de façon étrange ; il les baptise « transuraniens ».

Les découvertes se succèdent jusqu'à la plus déconcertante d'entre elles, la fission de l'atome. Après les travaux d'Otto Hahn, Lise Meitner, et Fritz Strassmann, après ceux d'Irène Curie et de Pavel Savitch, Hahn et Strassmann publient le 6 janvier 1939 les résultats d'expériences qu'ils n'osent interpréter. Quelques jours plus tard, la preuve est finalement apportée par Lise Meitner et Otto Frisch que le noyau d'uranium a bel et bien éclaté sous l'impact d'un neutron.

Dans les semaines qui suivent, la compétition s'engage principalement entre l'équipe du Collège de France, composée de Hans von Halban, Lew Kowarski et de leur chef Frédéric Joliot d'une part, et celle de l'université Columbia de New York derrière Fermi et Szilard d'autre part, pour mener des expériences en vue de l'exploitation de l'énergie

¹ Cf. Sievert, Rolf M., « The Work of the International Commission on Radiological Protection » *Actes de la seconde conférence des Nations unies sur l'utilisation pacifique de l'énergie atomique, Genève, 1958*, Nations unies, N.Y., vol. 9, P/2263, 1959, p. 3-7. La commission compte quatre physiciens et un radiologiste. Elle sera transformée en 1950 en une Commission internationale sur la protection radiologique (ICRP). Entre 1928 et 1950, le concept à la base des normes de radioprotection est celui de la « dose de tolérance » qui suppose un seuil d'exposition aux radiations en dessous duquel aucun effet dommageable ne se produit. Après Hiroshima le concept de dose admissible sera abandonné au profit de celui de « dose maximum admissible » : l'idée selon laquelle les radiations sont inoffensives en-dessous d'un certain seuil est rejetée et on prend désormais en compte les effets possibles cumulés sur toute une vie ; en second lieu, la Commission établira une limite de dose pour la population en général, fixée à un dixième de la dose pour les travailleurs.

colossale qu'on sait résulter de la fission. Le 22 avril, l'équipe française annonce dans la revue *Nature* que 3,5 neutrons sont libérés lors de la fission (la valeur réelle est plus proche de 2,5). Cette publication va convaincre de nombreux savants de la possibilité de la réaction en chaîne et précipiter des programmes de recherche sur l'énergie et l'armement nucléaire dans de nombreux pays. Il est en effet clair dès lors que deux applications découlent directement du principe de la fission et de sa libération colossale d'énergie, qu'elle soit libérée de façon contrôlée à des fins énergétiques, ou de façon explosive à des fins destructrices.

1.1.2. Les brevets Joliot

L'équipe de Frédéric Joliot, à laquelle collabore Francis Perrin qui apporte au groupe la notion de « valeur critique » de la masse d'uranium nécessaire pour l'entretien de la réaction en chaîne, décide de déposer ses idées sous forme d'une série de brevets d'invention, au nom de la Caisse nationale de la recherche scientifique au début du mois de mai 1939.

Le premier brevet,² demandé le 1^{er} mai 1939, est intitulé « Dispositif de production d'énergie ». Il témoigne de la préoccupation de ses auteurs à trouver un moyen de contrôler la réaction en chaîne pour empêcher tout le dispositif d'exploser :

On sait que l'absorption d'un neutron par un noyau d'uranium peut provoquer la rupture de ce dernier avec dégagement d'énergie et émission de nouveaux neutrons en nombre en moyenne supérieur à l'unité. Parmi les neutrons ainsi émis, un certain nombre peuvent à leur tour provoquer – sur des noyaux d'uranium – de nouvelles ruptures, et les ruptures de noyaux d'uranium pourront ainsi aller en croissant suivant une progression géométrique, avec dégagement de quantités extrêmement considérables d'énergie. [...]

Mais on se heurte immédiatement à une difficulté primordiale : ces chaînes pouvant se ramifier d'une manière illimitée, la réaction peut devenir explosive, ce qui restreindrait considérablement les possibilités d'utilisation de la masse d'uranium en question comme source maniable d'énergie industrielle.

On a donc cherché à maîtriser le dégagement d'énergie en l'empêchant de devenir explosif [...].

La question de la sécurité est immédiatement posée, et l'une des premières idées en la matière consiste à utiliser des moyens intrinsèques de contrôle, basés sur les propriétés physiques de la matière : en particulier l'augmentation de température peut être un frein au développement de la réaction en chaîne et les auteurs du brevet suggèrent d'utiliser un absorbant de neutrons, « dont le coefficient d'absorption (ou la section

² Brevet n° 976.541 du 1^{er} mai 1939.

efficace) devienne d'autant plus important par rapport à celui (ou celle) de l'uranium que la température est plus élevée » que l'on pourrait insérer si la réaction devenait trop rapide, le cadmium.

Après ces principes physiques, les auteurs résument le fonctionnement d'un réacteur nucléaire :

Désormais, le dispositif de production d'énergie nucléaire conforme à l'invention se trouve donc constitué par une masse d'uranium ou de composé d'uranium, contenant en son sein un élément de ralentissement des neutrons sous forme homogène ou non, et un élément absorbant, sous forme également homogène ou non, le tout pouvant être renfermé dans une enveloppe.

Grâce à l'action combinée de ces deux éléments au sein de la masse [i.e. ralentisseur et absorbant], lorsque la réaction s'amorcera [...], la stabilisation de cette réaction s'effectuera automatiquement et sans qu'une explosion puisse se produire.

Au fur et à mesure du dégagement d'énergie, cette dernière sera extraite pour des fins industrielles [...].

Le brevet donne la définition de la masse critique – la masse minimum de matière fissile pour que puisse s'établir la réaction en chaîne – et les moyens de la réduire par ajout d'éléments en fer ou plomb autour de la masse d'uranium.

Un deuxième brevet, déposé le lendemain 2 mai 1939, présente lui un « Procédé de stabilisation d'un dispositif producteur d'énergie ». ³ On n'envisage plus seulement les propriétés intrinsèques de la matière pour stabiliser la réaction mais on ajoute un dispositif spécial de contrôle, en mettant à profit le fait que les chaînes mettent un certain temps à se développer.

Les auteurs proposent une série d'idées pour un tel dispositif : ils envisagent par exemple de « constituer la masse d'uranium de plusieurs éléments distincts que l'on rapproche et que l'on écarte les uns des autres momentanément et périodiquement de manière à réaliser pendant des durées limitées et déterminées les conditions du développement illimité des chaînes. » La masse d'uranium pourrait être constituée d'une partie fixe et une partie mobile manœuvrable. Ce pourrait être également l'enveloppe diffusante externe que l'on éloigne ou rapproche périodiquement de la masse d'uranium. Un autre procédé envisage d'insérer périodiquement dans la masse d'uranium un écran fait dans une matière susceptible d'absorber les neutrons. On pourrait également insuffler périodiquement un gaz à base d'hydrogène, de deutérium, de cadmium ou de mercure, ou encore soumettre la masse d'uranium à des vibrations appropriées.

³ Brevet n° 976.542 du 2 mai 1939.

À ce niveau les auteurs ajoutent une remarque qui est le fondement de la possibilité du contrôle de la réaction en chaîne : une partie des neutrons produits par la fission, les neutrons secondaires, sont émis avec un certain délai, allant de quelques secondes à plusieurs dizaines de secondes. Grâce à cette propriété de la nature, les appareils nécessaires au contrôle de la réaction en chaîne peuvent se contenter de temps de réponse de l'ordre de la fraction de seconde et non du dix millième de seconde. Il s'agit donc de concevoir le réacteur de telle façon que la réaction en chaîne ne puisse pas être maintenue avec les seuls neutrons prompts, mais qu'elle ne se développe qu'en comptant sur les neutrons retardés également. Ceci donne une constante de multiplication des neutrons de plusieurs secondes ce qui permet un contrôle aisé de la réaction.

Alors que les deux premiers brevets s'attachent aux utilisations pacifiques de l'énergie atomique en insistant sur les moyens de maîtriser la réaction en chaîne, un troisième brevet, déposé le 4 mai, envisage des « Perfectionnements aux charges explosives. »⁴ La progression géométrique de la réaction en chaîne pouvant devenir illimitée, celle-ci peut être explosive et utilisable « non seulement pour des travaux de mine et pour des travaux publics, mais encore pour la constitution d'engins de guerre, et d'une manière générale dans tous les cas où une forte explosion est nécessaire. » À partir d'une formule permettant de calculer la masse critique pour un volume sphérique, le brevet indique à titre d'exemple une masse critique de plusieurs dizaines de tonnes pour de l'oxyde d'uranium en poudre et de quelques tonnes pour de l'uranium métallique. Ces masses étant considérables, le brevet envisage différents moyens pour les diminuer, en jouant sur la composition ou la configuration des matériaux utilisés. Différents mécanismes d'amorçage de l'engin sont proposés, comme le rapprochement de diverses parties de la masse préalablement séparée – ce qui sera réalisé à Los Alamos quatre ans plus tard – ou un démarrage de la réaction par compression de la structure de cette masse. Un certain nombre de procédés sont également décrits pour éviter une explosion prématurée.

À partir de juillet 1939, les membres de l'équipe Joliot déménagent leurs activités au Laboratoire de synthèse atomique d'Ivry et dans une annexe de l'Institut du radium à Arcueil. Après la déclaration de guerre en septembre 1939, Joliot, Halban et Kowarski multiplient les expériences et les calculs. Au printemps 1940, ils déposent deux nouvelles demandes de brevet. Ceux-ci sont signés par Hans-Heinrich von Halban, Jean-Frédéric Joliot et Lew Kowarski, en l'absence de Francis Perrin, et portent tous deux sur des perfectionnements apportés aux dispositifs

⁴ Brevet n° 971.324 du 4 mai 1939.

producteurs d'énergie.⁵ Le premier perfectionnement consiste à « enrichir la masse d'uranium en isotope 235 », par diffusion thermique. Le second brevet porte sur la forme, les dimensions et la disposition des « éléments de ralentissement », ce qu'on appelle communément le modérateur : cette idée de Kowarski consiste à maintenir les neutrons à l'écart de l'uranium pendant qu'ils ralentissent, à l'aide de blocs de modérateur pur situés à l'intérieur de la masse d'oxyde d'uranium. Ces perfectionnements marquent les progrès effectués au cours du second semestre de 1939 en France, alors qu'on aboutit aux mêmes conclusions aux États-Unis.

1.1.3. La pile atomique : une question scientifique et technique

1.1.3.1. La pile de Chicago

En effet, à l'été 1939, Bohr et Wheeler, à Princeton, avaient montré dans un article théorique que seul l'isotope rare de l'uranium (l' U^{235}) est fissile ; l'autre, l' U^{238} , qui représente 99,3 % de la masse de l'uranium naturel, se contente d'absorber les neutrons sans éclater. Fermi de son côté comprenait qu'un mélange homogène d'uranium et d'eau avait peu de chance de permettre la réalisation d'un système critique ; un tel système serait au contraire bien plus facile à obtenir à partir d'un dispositif hétérogène séparant l'uranium et le modérateur. Fermi montrait également que la réaction en chaîne serait facilitée en utilisant un modérateur moins absorbeur de neutrons que l'hydrogène, le carbone.

Les principes régissant le fonctionnement d'une machine étaient réunis, il allait falloir les tester. Alors que les Français s'orientaient vers l'eau lourde comme ralentisseur et que l'équipe de Joliot était dispersée par la guerre, Fermi allait réaliser la première réaction en chaîne auto-entretenu : le 2 décembre 1942, sous le stade de Chicago, la première « pile » atomique « diverge ». Ce premier réacteur est constitué par l'empilement (d'où le terme « pile » utilisé à l'époque) de près de cinquante mille briques d'un graphite très pur, dont certaines sont creusées pour contenir des boules d'uranium oxyde ou métallique.

Étant donné le danger et malgré les considérations théoriques concernant la possibilité de contrôle de la réaction grâce aux neutrons retardés, les physiciens restaient préoccupés et avaient multiplié les dispositifs de sécurité pour cette première divergence : les barres absorbantes de neutrons plongeant dans le cœur étaient retirées le plus lentement possible, des mesures étaient prises pour contrôler le nombre de neutrons, des systèmes étaient disposés de manière à insérer les barres

⁵ Brevets n° 971.384 du 30 avril 1940 et n° 971.386 du 1^{er} mai 1940.

absorbantes au cas où les choses tourneraient mal, et en cas de défaillance de ces dispositifs, un expérimentateur – peu rassuré dit-on – se tenait au-dessus de la pile avec un récipient contenant une solution de cadmium.

1.1.3.2. L'intervention des ingénieurs

La démonstration était apportée, les physiciens avaient inventé l'énergie atomique, prédit les différents phénomènes, compris les principes régissant le fonctionnement d'un réacteur avant qu'il soit construit. La réalisation des installations allait poser des problèmes d'une nature différente : la difficulté avait été touchée du doigt avec la nécessité de rassembler un graphite d'une pureté exceptionnelle, problème de nature moins de physique qu'industrielle.

Or à partir de l'entrée en guerre des États-Unis, une course de vitesse s'est engagée pour la production des matières nécessaires à la réalisation d'une bombe atomique, et en particulier pour la livraison de plutonium. Les États-Unis lancent à cette fin la construction de trois grands centres atomiques, à Hanford dans l'État de Washington, à Oak Ridge dans le Tennessee et à Los Alamos dans le désert du Nouveau-Mexique. La responsabilité de l'ensemble du programme de fission est transférée à l'armée sous la direction du général Groves, qui s'appuie sur les ingénieurs de la société Du Pont, notamment pour les piles à graphite plutonigènes de Hanford. Les savants purent se sentir dépossédés de leurs découvertes. Ils estimaient également que les installations ne pourraient pas être réalisées suffisamment vite si on les confiait à des militaires, des administrateurs ou à des ingénieurs ne connaissant rien à la physique nucléaire.

Au sujet des réacteurs de Hanford, le physicien Edward Teller raconte une anecdote⁶ illustrant les désaccords entre les ingénieurs de Du Pont et les physiciens. Ces derniers pensaient pouvoir calculer exactement la taille du réacteur sur la base de leurs connaissances fondamentales, ce à quoi les ingénieurs de Du Pont rétorquaient qu'il faudrait le construire beaucoup plus grand, quitte à mettre plus de temps, et on les suivit. Après démarrage, le réacteur fut victime d'un phénomène imprévu : l'empoisonnement xénon. Si les physiciens avaient prévu que certains des produits de fission pourraient absorber des neutrons et ainsi agir comme des poisons, le comportement du plus important d'entre eux

⁶ Cf. Teller, Edward., « An Informal History of Atomic Energy », in Mills, Mark M., Biehl, Arthur T., Mainhardt, Robert (eds.), *Modern Nuclear Technology*, New York, McGraw Hill, 1960, p. 1-13, p. 11. Traduit par nos soins.

leur avait échappé : l'iode radioactif⁷ qui se transforme en xénon absorbeur de neutrons. Teller reconnaît que c'est seulement parce que le réacteur fut construit plus grand que nécessaire, conformément aux recommandations des ingénieurs, qu'une réactivité supplémentaire fut disponible pour contrer cet effet inconnu, l'effet xénon. La production de plutonium put être poursuivie de façon ininterrompue.

Ce concept d'ingénieur, les marges de sécurité, jouera un rôle majeur dans le développement et la sûreté de l'énergie atomique au cours de ses premières années. Dans un deuxième temps, on essaiera de les réduire pour des raisons économiques, après qu'on aura mieux cerné les principes qui régissent le fonctionnement de ces nouvelles machines.

1.1.3.3. L'expérience des Français au Canada

Les Français réfugiés au Canada et qui participent aux recherches atomiques à visée militaire, Halban, Kowarski, Auger mais aussi Bertrand Goldschmidt et Jules Guéron, sont confrontés à la même nécessité que les scientifiques américains de collaborer avec les ingénieurs des firmes industrielles pour bénéficier de leur savoir-faire technique, par exemple pour l'évacuation de l'énergie.⁸

Ils collaborent ainsi au premier projet de grande pile expérimentale canadienne NRX (National Research Experiment) qui démarre grâce à la décision des États-Unis de fournir au Canada l'uranium métallique, l'eau lourde et les informations nécessaires. Kowarski est même chargé du projet qu'il baptise ZEEP (Zero Energy Experiment Pile), décidé après une visite auprès de Walter Zinn au laboratoire d'Argonne (non loin de Chicago). Celui-ci faisait déjà fonctionner une pile à eau lourde et lui transmet de nombreux renseignements utiles. ZEEP diverge quelques mois après la fin de la guerre, NRX divergera en 1947.

Pour les responsables scientifiques et politiques, le potentiel de l'atome a été dévoilé, de façon fracassante sur le plan militaire avec les deux explosions d'Hiroshima et Nagasaki les 6 et 9 août 1945, mais aussi sur le plan industriel. De grandes agences gouvernementales vont être créées dans les pays industrialisés pour assurer le développement de l'énergie atomique.

⁷ Celui-ci se désintègre avec une période de quelques heures en xénon radioactif, qui vit à son tour quelques heures mais possède une section efficace d'absorption énorme. Tant que le réacteur fonctionne, le xénon fabriqué disparaît naturellement avec le temps, mais si le réacteur vient à être arrêté pour quelques heures, l'iode produit réintroduit le xénon qui s'accumule et il devient difficile de faire redémarrer le réacteur.

⁸ Cf. Weart, S., *La grande aventure des atomistes français. Les savants au pouvoir*, Paris, Fayard, 1980, p. 278.

1.2. Les débuts du CEA : protection et sécurité par les techniciens eux-mêmes (1945-1951)

1.2.1. Création du Commissariat à l'Énergie Atomique

Dès la fin du conflit mondial, Frédéric Joliot envisage avec Irène Joliot-Curie, Raoul Dautry, Pierre Auger et Francis Perrin, la création d'un établissement de caractère scientifique, technique et industriel, chargé des questions concernant l'Énergie Atomique. À la suite d'entretiens officiels de Joliot avec les autorités anglaises à Paris et à Londres entre décembre 1944 et juillet 1945, le général de Gaulle charge Joliot et Dautry de préparer les projets d'ordonnance et de décret instituant le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA).

L'ordonnance est publiée au Journal Officiel le 18 octobre 1945. Placé sous l'autorité directe du président du Conseil, le nouvel organisme est chargé du développement atomique aussi bien à des fins scientifiques, industrielles que de défense. Il dispose d'un statut particulier lui conférant une autonomie financière et administrative. À sa tête se retrouvent les grands noms de la recherche atomique : la fonction de haut-commissaire, chargé des questions scientifiques et techniques, est attribuée à Frédéric Joliot. La partie administrative et financière est confiée à un administrateur général, Raoul Dautry.⁹ Cette direction bicéphale est assistée d'un Comité de l'énergie atomique, comprenant Irène Joliot-Curie, Pierre Auger, Francis Perrin, le général Dassault.

Dans la présentation qu'il fait au chef du Gouvernement, Félix Gouin, le 19 mars 1946, Joliot détaille les moyens humains et matériels dont dispose le Commissariat à ses débuts :

MM. Kowarski, Guéron et Goldschmidt, d'accord avec les autorités britanniques et américaines rentrèrent en France, parmi nous. Ils travaillent au Commissariat depuis deux mois, et leur expérience, ainsi que celle de M. Pierre Auger, nous permettra d'éviter des tâtonnements longs et onéreux. Les relations entre la Défense Nationale et le Commissariat sont assurées par un commissaire, le général Dassault, président du Comité de coordination des études scientifiques de Défense nationale. En résumé, la situation de la France concernant l'Énergie atomique est la suivante : elle dispose d'une équipe de savants ayant participé aussi bien à l'origine des recherches

⁹ Raoul Dautry est l'archétype du technocrate que l'on rencontrera souvent dans la suite du récit. Né en 1880, polytechnicien (X 1900), ingénieur à la Compagnie des chemins de fer du Nord (1903-1928) avant d'être directeur général des Chemins de fer de l'État (1928-1937), Raoul Dautry est ministre de l'Armement (1939-1940) et joue un grand rôle dans la récupération du stock d'eau lourde de la Société norvégienne Norsk Hydro par l'équipe de Jacques Allier. Il est nommé ministre de la Reconstruction et de l'Urbanisme du gouvernement provisoire à la Libération.

dans ces domaines qu'aux réalisations faites à l'étranger, et de nombreux collaborateurs scientifiques spécialistes de la physique travaillant dans nos laboratoires. Concernant les matières premières, elle dispose d'un stock d'uranium, constitué avant juin 1940 – de gisements d'uranium dans l'Empire, suffisants pour une première étape de réalisation, enfin de grands espoirs dans la découverte de gisements nouveaux –, d'une priorité en Norvège concernant une commande d'eau lourde.¹⁰

Tous les moyens semblent donc réunis pour parvenir au plus vite à la construction de la première pile atomique française.

1.2.2. ZOÉ

Dès 1946, le CEA se donne pour priorité la construction d'une pile à eau lourde : le stock d'uranium (plusieurs tonnes en provenance du Haut-Katanga au Congo) est suffisant et l'on dispose de l'eau lourde norvégienne. Cette pile est confiée à Kowarski¹¹, qui bénéficie d'une large expérience pour avoir construit la pile à eau lourde canadienne en septembre 1945. Sur proposition de Goldschmidt en juillet 1947, il est décidé, pour obtenir la divergence au plus tôt, d'utiliser de l'oxyde d'uranium au lieu d'uranium métal qui pose des problèmes métallurgiques de mise au point. On doit renoncer de ce fait à un dégagement notable d'énergie. La pile ZOE, dont les initiales témoignent de ces choix (puissance Zéro, Oxyde d'uranium, Eau lourde), est construite dans l'ancien fort de Châtillon, mis à disposition par le ministre des Armées par l'intermédiaire du général Dassault.

Le témoignage de Lew Kowarski près de vingt ans après les faits permet d'imaginer l'état d'esprit des ingénieurs dans cette première phase du développement des applications de la fission. Leur objectif est de maîtriser au plus vite une technique nouvelle et prometteuse et ils ont conscience de participer à une aventure des temps modernes, en compétition avec d'autres scientifiques à l'étranger. Kowarski semble assez sûr de lui, un peu inconscient pourrait-on même penser :

La réduction de notre ambition à l'énergie zéro nous épargna dans l'immédiat non seulement tous les problèmes de métallurgie d'uranium, mais aussi ceux du refroidissement, en réduisant ainsi le pompage à sa plus simple ex-

¹⁰ Joliot-Curie, Frédéric, « le programme du CEA », reproduit dans les *Échos du CEA*, Numéro Spécial, octobre 1965, p. 15-16.

¹¹ Lew Kowarski (Saint-Petersbourg 1907-Genève 1979), après avoir émigré de Russie en 1918, a commencé ses études en Pologne, en Belgique, puis à l'Université de Lyon, où il a obtenu en 1928 le diplôme d'ingénieur de l'École de Chimie Industrielle. Ingénieur à la société Le Tube d'acier pendant plusieurs années, il a préparé en parallèle une thèse de doctorat ès sciences en physique moléculaire sous la direction de Jean Perrin, avant d'entrer en 1934 au laboratoire Curie dirigé par Frédéric Joliot.

pression. Avec un flux ne dépassant pas le centième de celui prévu à l'origine, les problèmes de protection radiologique perdaient de leur acuité. Me trouvant trop flegmatique à cet égard, quelqu'un me demanda un jour sur un ton alarmé : « mais ces radiations, même à l'énergie dite zéro, sont dangereuses ; que ferez-vous le jour où elles se manifesteront à Châtillon ? » Je répondis : « Nous pavoiserons ».¹²

Kowarski avait d'autres soucis. Du point de vue de la réussite de l'opération, il était moins préoccupé par les dangers des rayonnements que par les incertitudes sur la maîtrise des phénomènes physiques ou sur les propriétés technologiques des matériaux à la base de la réaction en chaîne. Ne disposant pas de l'expérience de Los Alamos, les savants français doivent combler seuls leur retard. Et à cette étape, ce n'est pas tant la crainte qu'on ne puisse pas contrôler la réaction que la peur qu'elle ne se produise pas qui domine :

J'étais beaucoup plus soucieux de savoir comment l'oxyde se comporterait dans la réaction en chaîne. En effet, toutes nos connaissances nucléaires, soit empiriques (tirées de l'expérience canadienne de 1945), soit théoriques, se rapportaient à l'uranium non combiné ; on savait bien que l'oxygène présent dans l'oxyde aurait un effet déprimant sur la réaction en chaîne, mais dans quelle mesure ? Comparées aux barres métalliques, celles en oxyde devraient contenir davantage d'uranium – combien ? Dans notre ignorance des données physiques de base, il fallait soit essayer de les deviner et d'en déduire les dimensions et l'écartement des barres par un calcul approprié, soit deviner ces dimensions directement. Était-on sûr de deviner juste ? L'expérience ultérieure a montré, en fait, que notre évaluation de l'effet d'oxygène était trop pessimiste et que, pour le compenser, nous avons calculé d'une façon plus que généreuse les dimensions minima de la pile. Cette marge de sécurité inespérée fut, d'ailleurs, en partie annulée par les impuretés sporadiques de l'uranium qui échappaient à notre contrôle analytique et qui ne purent finalement être décelées qu'en étudiant le comportement nucléaire des barres individuelles d'uranium dans la pile en marche.¹³

Kowarski ne faisait qu'une confiance limitée aux calculs neutroniques, effectuant de son côté des calculs qu'il qualifiait de « pifométriques », et ce sont les calculs effectués par André Ertaud¹⁴ qui fixent

¹² Kowarski, L., « Zoé : le départ des piles françaises », *Échos du CEA*, Numéro Spécial, octobre 1965, p. 21-23.

¹³ *Ibid.*

¹⁴ Officier de marine, docteur ès sciences, spécialiste des microscopes électroniques, André Ertaud (1910-2003) est chercheur au laboratoire de Maurice de Broglie au Collège de France en 1945. Il participe en mai 1945 à une mission en Allemagne dans la zone d'occupation française pour recueillir des informations sur les progrès réalisés par les Allemands pendant la guerre dans le laboratoire de physique atomique d'Hechingen. Il entre au CEA en 1946.

les dimensions de la pile ZOE, notamment les dimensions des barreaux d'oxyde et leur espacement optimum dans la cuve d'eau lourde.¹⁵ Une inconnue demeurait concernant la densité exacte de l'oxyde, fabriqué en céramique dans des fours spécialement construits à Châtillon.

ZOE diverge le 15 décembre 1948,¹⁶ avec une hauteur critique d'eau lourde de 1,77 m pour une valeur de 1,79 m calculée avec la bonne densité d'oxyde. Une anecdote racontée par Jules Guéron illustre les incertitudes, l'empirisme des débuts, ainsi que les pratiques des physiciens en matière de sécurité lors de leurs expériences :

Pour faire diverger ZOE on transvasait de l'eau lourde, par une pompe à faible débit, du réservoir inférieur à la cuve proprement dite. Une des premières expériences, après la divergence initiale, cherchait à déterminer le changement de réactivité correspondant au retrait d'une des « chaussettes » contenant les petits blocs cylindriques d'UO₂ [...]. Ceci devait élever le niveau de divergence, pensait-on. Les opérateurs, las de presser le bouton d'actionnement de la pompe, qu'une sécurité faisait disjoncter toutes les 30 secondes, se dirent qu'il serait plus simple de pomper en continu jusqu'au niveau de divergence initial, puis de procéder lentement. Nul n'avait imaginé que le réseau de ZOE pût être sous-modéré, et que le retrait du combustible augmenterait la réactivité. La sécurité fut donc court-circuitée. Heureusement, le débit de la pompe était lent, on surveillait les instruments... et ZOE ne subit pas l'accident qui devait survenir quelques années plus tard à Vinca,¹⁷ en Yougoslavie, mais nous l'avions échappé belle. Moralité : ne jamais court-circuiter un dispositif de sécurité !¹⁸

¹⁵ Le combustible de ZOE est composé d'oxyde d'uranium, comprimé en pastilles empilées dans des gaines d'aluminium de 1,8 m de haut et 7 cm de diamètre, en 69 barres, disposées en réseau hexagonal. Elles plongent dans une cuve d'aluminium de 1,91 m de diamètre et 2,35 m de hauteur, remplie d'eau lourde. Un réflecteur en graphite entoure la cuve. De l'air pur passe dans l'intervalle situé entre la cuve et le réflecteur pour assurer le refroidissement. La protection du personnel est assurée par un mur en béton armé de 1,5 m d'épaisseur.

¹⁶ L'état-major de la divergence de ZOE est composé de messieurs Echard (approvisionnement industriel), Ertaud (expériences et calculs physiques préliminaires), Goldschmidt (fabrication de l'oxyde d'uranium), Guéron (chimie générale), Le Meur (construction mécanique), Stohr (physique industrielle) et Surdin (construction électrique).

¹⁷ L'accident qui surviendra le 15 octobre 1958 sur la pile expérimentale à eau lourde de Vinca en Yougoslavie provoquera l'irradiation à très haute dose de six techniciens. L'un succombera à ses blessures. C'est une avarie du circuit de montée d'eau lourde dans la cuve qui a provoqué une excursion de puissance, passée inaperçue des expérimentateurs en l'absence de système de sécurité automatique.

¹⁸ Jules Guéron, texte postérieur à 1979, cité par Georges et Maurice Géron, *Jules Guéron (1907-1990), Aperçus d'une vie dans un monde en mutation*, 1992, p. 77-78.

1.2.3. Le Service d'électronique du CEA (1945-1951)

Dans les années qui courent de 1945 à 1951, le CEA traite les risques dus aux rayonnements et aux substances radioactives comme un problème de sécurité du travail classique : on estime qu'il est du ressort des agents eux-mêmes d'assurer leur protection, du moment qu'ils sont au courant des risques qu'ils encourent. On ne voit pas l'intérêt d'une organisation spécifique consacrée à la protection contre les rayonnements. Mais, pour se protéger des rayonnements, il faut tout d'abord les détecter, et c'est le service chargé de tous les problèmes d'électronique au CEA, le Service d'électronique dirigé par M. Surdin¹⁹ qui est chargé de mettre au point divers dispositifs de mesure des rayonnements, les premiers stylos électromètres individuels, dosimètres photographiques, dosimètres collectifs ou d'ambiance (chambres Baby, Babylog puis Babyline).

Petit à petit, on prend conscience de la nécessité d'une organisation particulière chargée d'étudier et de mettre en œuvre la prévention et la surveillance des risques dus aux substances radioactives, ce qui donnera naissance au Service de protection contre les radiations en 1951. Quant aux mesures et dispositifs de sécurité des piles, ce sont les savants et les techniciens impliqués directement dans les projets qui les définissent et les mettent en œuvre. Ce n'est qu'à partir de 1957 qu'on ressentira la nécessité de confier à un organisme spécialisé les questions de sécurité des piles.

1.2.4. P1 et les études de protection

ZOE est améliorée en 1952 et 1953. Cette nouvelle pile, d'une puissance thermique de 150 kW, appelée P1, puis EL1, utilise l'uranium métallique désormais disponible à la place de l'oxyde d'uranium. Le flux de neutrons au centre de la cuve est sensiblement plus important, 10^{12} n/cm².s au lieu de 3.10^{10} . La nouvelle pile est utilisée notamment pour les études de protection. Chaque projet de réacteur s'accompagne en effet d'une étude des niveaux de rayonnement dans les différents milieux (eau, graphite, acier, plomb, béton, liquides organiques, etc.), étude indispensable pour prévoir l'encombrement et le poids des blindages²⁰ devant assurer la protection biologique des techniciens. De ce

¹⁹ Ingénieur électronicien (École Supérieure d'Électricité 1932) d'origine palestinienne, Maurice Surdin avait travaillé au Collège de France sous la direction de Langevin jusqu'à la guerre, puis sur le radar en Grande-Bretagne : c'est dans son service que sont conçus les milliers de compteurs de divers types dont le CEA a besoin.

²⁰ Cette nécessité de protéger des rayonnements le voisinage immédiat des réacteurs est d'ailleurs un facteur qui limite les possibilités d'application de la fission à l'échelle industrielle : alors qu'on imaginait dans les années 1940 et au début des années 1950

fait, la conception des protections contre les rayonnements émis par les réacteurs est une branche d'une discipline scientifique nouvelle, fille de la fission et mère de l'énergie atomique, la neutronique.²¹

1.2.5. La neutronique au Service de physique mathématique : Yvon et Horowitz

La neutronique est en effet la discipline reine des débuts de l'énergie atomique : les neutrons étant à la base de la réaction en chaîne, la neutronique qui s'est constituée comme la science de la multiplication des neutrons, du contrôle de la réaction en chaîne, s'est trouvée au cœur du calcul des réacteurs.

Au début des années 1950, on ressent le besoin d'asseoir le développement des piles sur des bases plus théoriques, ce qui conduit à la création en 1949 du Service de physique mathématique au sein du CEA, à l'instigation de Jacques Yvon.

Lorsque Kowarski quitte le CEA pour le CERN, Yvon²² prend sa succession et devient en 1952 chef du Département d'études des piles (DEP), le département phare du CEA, le cœur de toutes les études de réacteurs menées au sein d'un Commissariat en pleine expansion. Il reste chef du DEP jusqu'en 1959, date à laquelle il prend la responsabilité de la Direction de la physique et des piles atomiques, jusqu'en 1962.²³

pouvoir construire des avions, des fusées, propulsés grâce à un réacteur à uranium, la taille et le poids des blindages nécessaires pour protéger les équipages s'avèreront rédhibitoires, et les seules applications concerneront des installations de grande taille comme les sous-marins et les centrales électronucléaires.

²¹ Notons qu'un certain nombre de physiciens qui font leurs armes sur le calcul des protections de réacteurs seront chargés par la suite des questions de sûreté. Cf. Bourgeois, J., Lafore, P., Millot, J.-P., Rastoin, J., de Vathaire, F., « Méthodes et coefficients expérimentaux des protections de réacteurs », *Rapport CEA n° 1307*, 1959.

²² Né à Angoulême en 1903, Jacques Yvon est admis à l'École Normale Supérieure en 1922. Il débute en 1927 une carrière de professeur. En 1937 il publie sa thèse consacrée à la mécanique statistique. En 1938 il est nommé maître de conférences de Physique Mathématique à la Faculté de Strasbourg et poursuit ses travaux de recherche sur l'interprétation de la thermodynamique et des propriétés des états de la matière en fonction de sa structure moléculaire. Déporté en Allemagne de 1943 à 1945, il retourne en 1946 à la faculté de Strasbourg comme professeur de physique théorique. Conseiller du CEA en 1948, il enseigne la théorie de la diffusion du neutron. Il est recruté au Commissariat par Jules Guéron en 1949 et est nommé chef du Service de physique mathématique, nouvellement créé.

²³ Jacques Yvon quittera le CEA en 1962. Professeur de théories physiques à la Faculté des sciences de Paris de 1962 à 1970, il restera cependant conseiller du haut-commissaire puis délégué auprès de la Direction des applications militaires. Quittant

Avec la création du Service de physique mathématique, l'objectif affiché par Yvon est de sortir les études neutroniques de l'empirisme :

Fermi et ses collaborateurs, dont il faut citer avant tout Wigner, avaient su sérier les problèmes, ils avaient su créer un cadre et un langage, choisir les bons paramètres, triomphé par un habile empirisme des situations qui défient le calcul. Mais nous connaissions surtout des recettes, dont il s'agissait de reconstituer les sources, de les dépasser si possible, afin de s'adapter à des situations nouvelles. J'ai rapidement compris que l'équation intégrodifférentielle de Boltzmann, légèrement adaptée, serait la charnière de l'arsenal des nouveaux physiciens mathématiciens. Le premier problème que j'ai ainsi pu tirer au clair est celui du ralentissement des neutrons dans une cellule de pile, entre les effets ralentisseurs et diffuseurs du modérateur et les effets capturants de l'uranium 238.²⁴

Le comportement des neutrons dans un système multiplicateur étant régi par l'équation de Boltzmann, « l'attention devait se déplacer de la physique nucléaire théorique vers la physique mathématique, et l'effort se porter sur les moyens de résoudre cette équation très complexe. »²⁵ Pour ce faire, Yvon va former, conseiller et diriger un petit noyau de jeunes théoriciens,²⁶ polytechniciens recrutés en 1946 par Francis Perrin, qui partent parfaire leurs connaissances dans les grands laboratoires à l'étranger, parmi lesquels, Jules Horowitz. Tous se retrouvent à Saclay en 1950 au Service de physique mathématique dirigé par Jacques Yvon. Pendant deux décennies, Jacques Yvon puis Jules Horowitz vont diriger la physique des réacteurs nucléaires en France, aussi bien la neutronique expérimentale que la modélisation des phénomènes.

Jules Horowitz est souvent présenté comme le fondateur de « l'École française » de neutronique. Né en 1921 à Rzeszow en Pologne, ingénieur de l'École polytechnique (dans la promotion 1941), licencié ès sciences, Jules Horowitz a donc rejoint le CEA en 1946. Parti se perfec-

à nouveau l'université, Yvon deviendra haut-commissaire à l'Énergie atomique en 1970, charge qu'il remplira jusqu'en 1975. Il décède en septembre 1979.

²⁴ Yvon, Jacques, *Œuvre scientifique*, tome I, Énergie atomique, CEA, p. 15-16, cité par Jean Bussac, « Le rôle du CEA dans les premiers développements de la neutronique », *Actes des Colloques du 50^e Anniversaire du CEA*, Tome II, Paris, CEA, 1997, p. 17-25, p. 20.

²⁵ Comme l'explique l'un des successeurs d'Yvon à la tête du Service de physique mathématique : Bussac, J., « Le rôle du CEA... », *op. cit.*, p. 21. À sa sortie de Polytechnique, Jean Bussac est entré le 1^{er} octobre 1951 au CEA dans le Service de physique mathématique d'Yvon. Il sera, de 1962 à 1970, le quatrième chef du service après Jacques Yvon, Jules Horowitz et Claude Bloch.

²⁶ Il s'agit de Claude Bloch et Michel Trocheris, orientés vers le CEA par leur professeur d'analyse à Polytechnique, Jean Ullmo. Au sein du CEA, ils reçoivent l'aide d'Anatole Abragam et d'André Ertaud. Albert Messiah, détaché du Corps des mines à l'instar de Bloch, se joint à ce groupe.

tionner un an à l'Institut de physique théorique de Copenhague, il publie en 1948 la première étude théorique de la désintégration du muon. De retour en France, il rejoint le tout nouveau Service de physique mathématique du CEA où il poursuit simultanément des travaux de physique pure et des calculs de pile. En 1952, Horowitz prend la tête du Service de physique mathématique et s'oriente vers l'étude des piles, la « pilologie » comme on dit à l'époque. Il sera nommé chef du Département des études de piles en 1959 puis directeur des Piles atomiques en 1962.²⁷

C'est une des grandes contributions d'Horowitz au génie atomique en France, au-delà de ses apports scientifiques, que d'avoir constitué un creuset, le « moule » d'où sortira toute une génération de jeunes ingénieurs appelés à occuper dans les décennies suivantes des positions dirigeantes de l'industrie nucléaire française. Outre d'être montés en même temps que leur poste avec l'expansion de l'énergie atomique, presque tous ces futurs dirigeants passés au Service de physique mathématique proviennent de l'École polytechnique.²⁸ Albert Messiah se souvient du rôle d'Horowitz dans l'expansion du Service à partir de 1952 et de leur méthode de recrutement :

Nous avons prospecté là où nous pensions avoir les meilleures chances de découvrir des gisements de bons chercheurs et tout naturellement, comme beaucoup d'entre nous étaient polytechniciens, nous avons cherché du côté de l'École Polytechnique : systématiquement, nous allions y faire des « amphis-retape » [...] Ces « amphis-retape » [...] ont eu énormément de succès. [...] Nous étions très attirants, notamment pour les têtes de promotion.²⁹

²⁷ Avec la réorganisation du CEA de 1970, Horowitz quittera le domaine des réacteurs pour diriger la recherche fondamentale du CEA, jusqu'en 1986. Président du Conseil du Joint European Torus de 1984 à 1987 dans le cadre de la fusion contrôlée, président du Conseil d'administration de l'European Synchrotron Radiation Facility 1988 à 1993, il décède le 3 août 1995.

²⁸ Parmi les polytechniciens passés par le Service de physique mathématique, outre Albert Messiah (X 1940), Michel Trocheris (X 1942), Claude Bloch (X 1942), on compte Roger Naudet (X 1945), Jean Bussac (X 1948), Pierre Tanguy (X 1948), Robert Dautray (X 1949), Jean-Claude Leny (X 1949), Oleg Trétiakoff (X 1950), Bernard Bailly du Bois (X 1950), Roger Delayre (X 1950), André Teste du Bailler (X 1951), Pierre Bacher (X 1952), Roger Balian (X 1952), Bernard Lerouge (X 1952), Max de Lamare (X 1952).

²⁹ « Hommage à Jules Horowitz », *CEA*, Saclay, 13 juin 1996, p. 47. Plus généralement, le CEA recrutera une forte proportion de polytechniciens : ils seront 140 en 1959, 250 en 1963, en comptant les militaires de la Direction des applications militaires et les chercheurs travaillant en physique des particules.

Le Service de physique mathématique est sans doute « le Saint des Saints »³⁰ du CEA, car de fait, tous les modèles de piles proposés au début de la décennie ont leurs caractéristiques dictées par la neutronique. Selon un éminent neutronicien : « La neutronique régnait absolument en maîtresse à l'époque. »³¹

Le monopole de la compétence en matière de physique des réacteurs est détenu par ces scientifiques, au sein du CEA, et ce monopole constitue bien une spécificité française.

1.2.6. EL2 : prototype d'une pile de puissance

Une fois la faisabilité de la réaction en chaîne démontrée avec ZOE, les physiciens ont hâte de démontrer que ce type de pile peut également produire de l'énergie. Grâce à l'expérience acquise et aux progrès réalisés à l'usine du Bouchet³² dans la fabrication d'uranium métallique, ils se lancent dans la construction d'une deuxième pile à eau lourde, la pile P2, plus tard appelée EL2, premier prototype d'une pile de puissance.

1.2.6.1. Les incertitudes du projet

Dans les mois qui suivent la divergence de Zoé, Eugène Le Meur³³ et Jacques Yvon s'attaquent à quatre avant-projets pour cette pile, dont le refroidissement est envisagé soit à l'air, au gaz comprimé, par circulation d'eau lourde ou encore par circulation d'eau ordinaire. À l'été 1949, le choix se porte sur le refroidissement par gaz comprimé, qui promet d'ouvrir la voie d'applications industrielles réalisables immédiatement.

Cependant, un certain nombre d'incertitudes demeurent comme le rappelle Kowarski, et l'on estime que les connaissances solides ne

³⁰ Selon François Cogné, entretien avec l'auteur, janvier 1999, Paris. Ingénieur mais non polytechnicien, François Cogné, qui jouera un grand rôle dans l'histoire de la sûreté, débute également sa carrière au Service de physique mathématique.

³¹ Vendryes, Georges, « Naissance d'une discipline scientifique : la neutronique. Introduction », *Actes des Colloques du 50^e Anniversaire du CEA*, Tome II, CEA, p. 14. Le Département d'études des piles comporte à partir de 1952, outre le Service de physique mathématique, une section (puis un service) de neutronique expérimentale. Georges Vendryes (X 1940) est chef de ce service en 1958.

³² La Poudrerie Nationale du Bouchet, située à environ 40 km au sud de Paris, accueille en 1946 une usine du CEA où sont réalisées les différentes opérations chimiques sur le minerai d'uranium. L'usine du Bouchet est dirigée par Paul Vertes assisté de Pierre Régnaut. C'est à l'usine du Bouchet que l'équipe de Goldschmidt, le 20 novembre 1949, isole les premiers milligrammes français de plutonium à partir de la dissolution des pastilles d'oxyde d'uranium fritté d'un barreau irradié pendant onze mois dans Zoé.

³³ Eugène Le Meur avait été choisi par Kowarski pour être ingénieur en chef de Zoé.

peuvent venir que de la construction et du comportement en marche du réacteur :

Il fallut passer par bien des déceptions et des tâtonnements pour arriver au procédé de fabrication de barres gainées d'uranium capables de supporter (et de dépasser) les températures envisagées à l'origine du projet. Les structures tubulaires durent être profondément modifiées de façon à supprimer les vibrations dangereuses qui s'étaient manifestées dans le courant gazeux. Par ailleurs, le choix logique du gaz (CO₂) comportait l'inconnue de sa stabilité sous irradiation, inconnue qui ne pouvait être levée qu'à l'aide du réacteur lui-même ; pour cette raison nous avons prévu un premier stade où le réacteur marcherait à l'azote comprimé, dont nous étions plus sûrs à l'avance – précaution prudente, mais superflue, car le gaz CO₂ se révéla stable et parfaitement capable d'assumer le rôle [...].³⁴

Si les calculs neutroniques commencent à sortir de l'empirisme grâce à une physique plus mathématique, il domine encore la résolution d'un grand nombre de facteurs d'ordre technologiques. Tout est nouveau ou presque en ce qui concerne les matériaux, leur élaboration comme leur résistance, ou le fonctionnement de la machine.

EL2 diverge le 21 octobre 1952. Elle est la première pile³⁵ construite sur le site du Centre nucléaire de Saclay, créé en 1949, à une trentaine de kilomètres au sud de Paris. Témoignage du peu de maturité de l'énergie atomique en France en 1955, et de son corollaire, le faible questionnement en matière de sûreté, Jacques Yvon pouvait écrire à l'occasion de la première conférence internationale sur les utilisations pacifiques de l'énergie atomique en 1955 :

Lors de la conférence de Genève, la question suivante nous avait été posée : Que faites-vous s'il y a une rupture de gaine ? Nous avons pu répondre fièrement que nous n'avions pas l'expérience d'un tel ennui. Ce qui prouvait que nos cartouches étaient d'une bonne fabrication. Mais, il faut l'avouer aussi, qu'elles n'avaient pas atteint un âge avancé. L'année passée notre expérience s'est améliorée à cet égard.³⁶

³⁴ Kowarski, L., « Zoé : le départ ... », *op. cit.*, p. 23. Kowarski est responsable d'EL2 jusqu'à son départ pour le CERN en 1952.

³⁵ Le combustible d'EL2 est constitué par 3 tonnes d'uranium naturel en 136 barres de 2,15 m de long, réparties suivant un réseau hexagonal. Les barres contiennent chacune quatre cartouches d'uranium superposées (26 mm de diamètre, 500 mm de long), gainées de magnésium. Ces barres plongent dans le modérateur composé de 5,7 tonnes d'eau lourde, contenu dans une cuve cylindrique d'aluminium de 2 m de diamètre et de 2,5 m de hauteur. Un réflecteur en graphite de 1 m d'épaisseur entoure la cuve. Le gaz carbonique réfrigérant circule autour des barreaux d'uranium puis est refroidi par de l'eau dans trois échangeurs.

³⁶ Yvon, J., « Les Piles Atomiques en France », *Le Journal de Physique et le Radium*, T. 18, n° 10, Octobre 1957, p. 538-546, p. 546.

La pile allait en effet connaître ses premiers incidents l'année suivante.

1.2.6.2. Premiers incidents d'EL2

Au cours de l'année 1956, diverses améliorations permettent de faire passer la puissance d'EL2 de 1 500 à 2 000 kW. Mais des incidents se manifestent à partir du 1^{er} juin 1956. Ce jour-là, on constate que la température d'une cellule s'élève anormalement. Simultanément, une activité radioactive élevée est décelée au voisinage des soufflantes qui assurent la circulation du gaz carbonique. La pile est arrêtée. La cellule en question est enlevée, ainsi que ses voisines qui présentent une contamination radioactive. L'examen aux rayons X montre un fort gonflement de la gaine d'une des cartouches. On peut supposer que la gaine est rompue, sans que l'observation permette de le prouver. C'est un service spécial, le Service de protection contre les radiations³⁷ qui effectue des mesures et en déduit que 25 grammes environ d'uranium ont brûlé.

Un nouvel incident se produit le 14 juillet : une activité nettement anormale due à des produits de fission est à nouveau détectée dans le gaz carbonique, la pile est arrêtée. L'observation montre que la gaine d'une cartouche centrale s'est fissurée. D'importants travaux seront nécessaires à la remise en marche de la pile : nettoyage des canalisations contaminées, installation de filtres sur le circuit de gaz carbonique et à la base de la cheminée.

Mais surtout, ces incidents accélèrent la mise au point d'un système de détection de ruptures de gaines (DRG). Ce système doit permettre de repérer les fuites au moment où elles se produisent, sans avoir à attendre qu'un service extérieur ne vienne mesurer la radioactivité qui s'est répandue suite à la rupture, ou à observer directement l'état des cartouches de combustible. Yvon décrit le principe de ce nouveau mécanisme de détection, essentiel pour la sécurité de l'installation, qui était seulement en préparation lors de l'accident :

À la sortie de chaque cellule, une fine canalisation prélève une petite quantité de fluide qui est envoyée devant des compteurs de rayonnement : si la gaine se rompt ou présente une fêlure, des produits de fission se répandent dans le gaz ; [...] Lorsqu'une cellule s'avère défaillante, il ne reste plus qu'à arrêter la pile et à décharger la file de cartouches incriminées. La détection de rupture de gaine permet d'intervenir avant que la fêlure ne soit franche de même que le thermocouple, moins spécifique, permet d'intervenir si une grosse déformation précède une fêlure.³⁸

³⁷ Nous présentons plus loin la genèse de ces premiers services au sein du CEA.

³⁸ Yvon, J., « Les piles atomiques... », *op. cit.*, p. 547.

Les Français ont six ans de retard sur les Britanniques qui avaient équipé leur pile de Windscale d'un système de contrôle des échantillons d'air provenant de chacun de ses 3 000 canaux.³⁹

L'exemple d'EL2 illustre deux aspects de l'histoire de la sécurité des piles dans cette première partie du développement de l'énergie atomique. Tout d'abord, la sécurité est du ressort des physiciens eux-mêmes. Ceux-ci prennent progressivement conscience du risque présenté par les installations atomiques et mettent petit à petit au point des instruments pour mieux contrôler la machine qu'ils conçoivent, construisent et exploitent. L'incident d'EL2 montre également l'intervention d'un Service dit « de protection contre les radiations » pour mesurer l'activité radioactive ; ce Service, de nature à la fois physique et biologique, fut en effet la première structure chargée de sécurité instituée au sein du CEA.

1.3. Première institutionnalisation : la protection. Médecins et ingénieurs (1951)

Une des problématiques de l'histoire de la sécurité nucléaire réside dans la difficile définition des rôles entre deux disciplines liées par la nature même du danger atomique : la (radio)protection et la sûreté. Le télescopage de ces deux disciplines émaille l'histoire de la maîtrise du risque nucléaire en France, à la fois du fait de la délimitation du champ d'activité – schématiquement, la sûreté doit mettre en œuvre les moyens pour éviter le rejet de substances radioactives tandis que la (radio)protection s'attache à la mesure de cette radioactivité et à ses conséquences sur la santé – mais aussi du fait de rivalités institutionnelles et de pouvoir entre des corps de métier aux traditions différentes. Les deux disciplines travailleront parfois de façon séparée ou en collaboration, leur poids respectif dans les préoccupations de sécurité sera fluctuant, en fonction de l'appréciation sociétale mouvante du danger nucléaire.

1.3.1. Une affaire de médecins : le Service de protection contre les radiations (SPR)

Au début de 1947 une division biologique et médicale était créée au CEA : celle-ci s'était consacrée à une sécurité industrielle classique (prise en charge des accidents du travail), et aux recherches biomédicales sur les isotopes radioactifs, et moins à protéger le personnel de la radioactivité. Or Zoé faisait courir un réel danger aux travailleurs, c'est pourquoi au début de 1949, Kowarski alla visiter le nouveau centre nucléaire britannique d'Harwell. À son retour, il conseilla de réviser et

³⁹ Cf. Pocock, R.F., *Nuclear Power. Its Development in the United Kingdom*, Old Woking, The Institution of Nuclear Engineers, 1977, p. 15.

de développer les services de protection. « Son grand souci était la protection des travailleurs ; la pollution de l'environnement n'inquiétait pas beaucoup, à ce stade, car on n'avait pas encore les moyens d'y provoquer des risques bien sérieux. »⁴⁰ Dans les premières années du Commissariat, l'essentiel de l'activité est constitué d'un travail de laboratoire, d'extraction de minerai, et les piles ont une puissance faible. On est donc moins préoccupé par les risques d'un accident qui disperserait de la radioactivité à l'extérieur que par le danger des rayonnements pour les personnels. Avec l'augmentation du nombre et de la puissance des machines au cours des années 1950 et 1960, les préoccupations concernant la maîtrise technique des machines, l'œuvre des physiciens et des ingénieurs, prendront le dessus sur les travaux des biologistes et des médecins.

Les questions de protection contre les rayonnements sont tout d'abord appréhendées sous les auspices du professeur Louis Bugnard,⁴¹ ingénieur et médecin, directeur de l'Institut national d'hygiène, et conseiller scientifique du CEA. Sous son impulsion est créée en 1951 la première structure permanente et centralisée du Commissariat chargée du problème des rayonnements : le Service de protection contre les radiations (SPR), directement rattaché au cabinet du haut-commissaire.⁴²

L'essentiel des missions du SPR apparaît du ressort des ingénieurs – on parle de « mise au point des techniques de détection et des moyens de protection » –, toutefois la collaboration avec les médecins est nécessaire par la pluridisciplinarité des recherches « physiques, chimiques et biologiques ». Il est également spécifié dans la note de création du SPR que le chef du service ainsi que le chef du Service sanitaire doivent assurer des échanges réguliers et réciproques des informations qu'ils recueillent. Et la note ajoute même que « l'un ou l'autre chef de service peut obtenir communication de tout dossier particulier qu'il désire, ce qui implique qu'ils appartiennent tous deux au corps médical. » Cet aspect juridique explique pourquoi c'est un médecin, le docteur Jammet qui est nommé⁴³ chef du SPR.

⁴⁰ Weart, S., *op. cit.*, p. 350.

⁴¹ Louis Bugnard (1901-1978) est ancien élève de l'École Polytechnique (X 1920).

⁴² Note de Service B-41 en date du 6 novembre 1951, signée par le haut-commissaire Francis Perrin. Archives CEA.

⁴³ Note de Service B-45 du 16 novembre 1951, signée du haut-commissaire Francis Perrin et de l'administrateur général Pierre Guillaumat. Archives CEA. Henri Jammet, jeune médecin électroradiologiste appelé à jouer un rôle de premier plan dans le domaine de la protection, a été recruté au CEA en 1950 sur recommandation du professeur Bugnard. Il avait rejoint le Service d'électronique de M. Surdin.

Ce Service comporte trois groupes, chargés de la protection dans les trois domaines principaux d'intervention du CEA : la protection autour de la pile Zoé, qui consiste essentiellement à assurer la dosimétrie individuelle des travailleurs ; la protection au cours de la mise au point des procédés chimiques de traitement du combustible et la préparation des isotopes radioactifs obtenus par irradiation en pile ; la protection et la surveillance du personnel des mines souterraines d'uranium.

Le SPR publie le 26 janvier 1953 un Règlement général sur la Protection contre les Radiations. Signé à la fois par le haut-commissaire et l'administrateur général, le règlement donne au SPR des attributions assez contraignantes pour les unités du CEA qui font fonctionner des installations puisqu'il assure au SPR l'accès sur tous les lieux de travail, lui donne la responsabilité du choix et de la mise en œuvre des méthodes de détection, l'élaboration des consignes de protection et la vérification de leur efficacité. Le règlement lui donne enfin le pouvoir d'arrêter toute activité jugée dangereuse. Ceci explique sans doute les réticences des chefs d'unités et leur manque de bonne volonté pour accueillir le système de contrôle mis en place. L'administrateur général et le haut-commissaire sont pour cela amenés à renforcer le SPR. Et pour éviter que le contrôle apparaisse trop coercitif et qu'il soit mal accepté par les unités opérationnelles, décision est prise de lui adjoindre un élément d'égale importance qui apporte un concours positif aux unités. Un groupe dit de « génie radioactif » est ainsi créé à Saclay en mai 1955.⁴⁴ Pour le diriger, un militaire de l'armée de terre, Francis Duhamel, est recruté en mai 1955. Il est nommé chef-adjoint du SPR.⁴⁵ Le Groupe de génie radioactif est chargé de centraliser les études concernant la Protection contre les radiations entreprises par le SPR et les autres services. Des ingénieurs sont ainsi associés aux médecins par l'intermédiaire de ce groupe.

1.3.2. Création du SHARP et du SCRGR. Médecins ici, ingénieurs là

Moins d'un an après la création du Groupe de génie radioactif, le SPR se scinde en deux, plaçant les ingénieurs d'un côté, les médecins de l'autre. Cette scission illustre la difficulté de définir l'objet de la protection, entre tâches d'ingénieurs et de médecins. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette séparation. Le CEA entre dans une phase de croissance

⁴⁴ Note de Service B-256 du 10 mai 55. Archives CEA.

⁴⁵ Le CEA est en train de mettre en place les structures pour la préparation des armes nucléaires, faisant ainsi appel à un certain nombre d'officiers des trois armées. Francis Duhamel (1915-2000) est ancien élève de l'École polytechnique (X 1936), sorti dans le Corps de l'infanterie coloniale.

exponentielle : les grands centres d'études ont été ou sont sur le point d'être créés ; l'exploitation des gisements d'uranium s'étend ; les grands programmes de recherche et de développement à la fois industriels et militaires sont lancés, ce qui accroît d'autant les responsabilités du SPR. Par ailleurs, la France est présente au sein des organisations internationales telles que la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) ou le Comité scientifique de l'ONU (UNSCEAR) créé en 1955 pour étudier les problèmes que pose l'augmentation de la radioactivité de la planète. Le professeur Bugnard et le Dr Jammet sont très impliqués dans ces travaux de ces organisations et ont besoin de s'appuyer sur un service du CEA plus orienté vers la recherche appliquée en radiopathologie. Un troisième motif à cette spécialisation est sans doute la difficulté de collaboration entre ingénieurs et médecins. C'est par ailleurs l'époque où de nombreux ingénieurs reviennent de visites aux USA où la protection est avant tout affaire d'ingénieurs.

C'est pourquoi décision est prise en 1956 de remplacer le SPR par deux services qui se veulent « à vocation complémentaire »⁴⁶ : le Service d'hygiène atomique et de radiopathologie (SHARP)⁴⁷ et le Service de contrôle des radiations et de génie radioactif (SCRGR). Le Groupe de génie radioactif créé en 1955 est rattaché au SCRGR. Le docteur Henri Jammet est nommé chef du SHARP et Francis Duhamel chef du SCRGR.⁴⁸ Pour éviter que cette spécialisation ne compartimente trop les problèmes, un Comité de protection contre les radiations est chargé de coordonner les deux services, qui malgré cela, vont se développer avec des destins différents, effectuant une distinction croissante entre les aspects « sanitaire » et « physique » de la protection, puis entre protection et sûreté.⁴⁹

1.3.3. Vie tourmentée du SCRGR jusqu'à sa suppression

La note instituant le SCRGR lui attribuait une fonction de contrôle qui allait poser certaines difficultés aux ingénieurs du service, confrontés à la mauvaise volonté des chefs des centres nucléaires. C'est pour-

⁴⁶ Note de Service B 300 du 6 avril 1956. Archives CEA.

⁴⁷ Le SHARP sera transformé en 1961 en un Département de protection sanitaire, rattaché à la Direction de la biologie et de la santé lors de sa création en 1964.

⁴⁸ Au sein du SHARP on peut citer les noms de Mme Alibert et M. Michon des laboratoires de radiobiologie et radiopathologie, rejoints par les docteurs Mechali et Lafuma. Côté SCRGR, citons quelques noms d'ingénieurs que nous rencontrerons souvent par la suite, messieurs Pradel, Candès, Lavie, Menoux.

⁴⁹ Un schéma présente en annexe l'évolution des organisations en charge de la protection et de la sûreté. Au départ regroupées, une distinction s'opère nettement entre une partie gauche « protection – biologie » et une partie droite « protection – sûreté ».

qu’où Francis Perrin édite en 1957 une nouvelle note⁵⁰ dont l’objet est le « Contrôle des installations » par le SCRGR qui les rappelle à l’ordre. Cette note, signée du seul haut-commissaire, donc contestable sur le plan administratif, ne sera dans l’ensemble pas respectée et dressera contre le SCRGR une grande partie des chefs d’unité du CEA.

Cet épisode témoigne en tout cas des préoccupations du haut-commissaire Francis Perrin considérant les problèmes de sécurité comme prioritaires. C’est à peu près à la même époque que Perrin charge Jacques Yvon de mettre en place un groupe de sécurité qui sera à la base de la création d’une Commission de sûreté des installations atomiques, qu’il présidera en personne. C’est également dans ces années, le 6 février 1958 exactement, qu’est créée, sur demande du responsable des Armes spéciales, une Commission de sécurité qui a la charge d’étudier les normes et consignes à respecter en ce qui concerne les essais atomiques militaires de Reggane. Francis Perrin lui-même préside cette commission, composée de personnalités scientifiques, médicales et militaires.⁵¹

Ce rôle de contrôle des activités des autres services du CEA, justifié par les impératifs de protection contre les radiations, met donc le SCRGR dans une position délicate. D’autant plus que la délimitation de ses compétences par rapport à celles du SHARP puis du Département de protection sanitaire (DPS) n’est pas évidente, ce dont témoigne un certain nombre de conflits entre les chefs des deux services.⁵² Le rôle du SCRGR deviendra plus flou après la création en 1960 de la première structure centralisée du CEA chargée de prendre en charge les problèmes de sécurité.⁵³ La tendance à la décentralisation de la protection peut également expliquer la perte de pouvoir du SCRGR : chaque centre ou usine ayant ses problèmes spécifiques, les directions d’établissement, qui ont la responsabilité de la sécurité, ont été amenées à créer des unités locales de radioprotection. Les responsables du CEA décideront en 1964 de supprimer le SCRGR.⁵⁴

⁵⁰ Note HC/1223 du 16 février 1957, signée F. Perrin. Archives CEA.

⁵¹ Ailleret, Charles (général), *L’aventure atomique française. Comment naquit la force de frappe*, Paris, Grasset, 1968, p. 278-280.

⁵² Note de Duhamel au chef du DPS, 28/2/64. Note de Jammet au chef du SCRGR, 3/3/64.

⁵³ Certaines des équipes techniques du SCRGR seront amenées à devenir des soutiens spécialisés des sous-commissions qui assureront l’interface entre les services techniques de sûreté et les instances de décision.

⁵⁴ Il est remplacé par deux services : l’un de protection, le Service technique d’études de protection (STEP), rattaché à la Direction de la biologie et de la santé (DBS) du professeur Bugnard, l’autre de sûreté radiologique, le Service d’études de sûreté radiologique (SESR), placé sous l’autorité directe du directeur de Cabinet du haut-

Mais c'est du sein du Département d'études de piles, le département développeur des réacteurs, que vont venir les préoccupations de ce qui deviendra la « sûreté nucléaire ».

1.4. Les ingénieurs, comme monsieur Jourdain... : la sécurité en marchant

1.4.1. Le tournant industriel et militaire du CEA (1952)

Au début des années 1950 se produit une profonde réorganisation du CEA. Avec le début de la guerre froide, les ministres du PCF ont dû quitter le gouvernement ; en 1949, l'année de la signature du Pacte atlantique, le CEA est secoué par une crise politique : Frédéric Joliot-Curie, président du Congrès mondial des partisans de la paix, déclare lors d'un meeting qu'il s'oppose à la fabrication d'armes atomiques, qui ne pourraient qu'être utilisées contre l'Union soviétique. Le gouvernement juge cette déclaration inadmissible de la part du chef scientifique de l'agence gouvernementale chargée du développement des applications de l'atome, et donc des armes : Frédéric Joliot est révoqué par Georges Bidault le 28 avril 1950. Francis Perrin lui succède à cette charge qu'il assumera pendant vingt ans, jusqu'en 1970. Quant au poste d'administrateur général, il subit également un changement de titulaire avec le décès de Raoul Dautry durant l'été 1951. Dautry est remplacé par Pierre Guillaumat. Sous la direction de Guillaumat, de 1951 à 1958, le CEA va connaître un développement fulgurant : il passe dans l'intervalle de 1 500 membres en 1951 à 10 700 en 1958.

L'ère des pionniers s'achève avec le départ de Joliot et la mort de Dautry. La réorganisation des structures internes du CEA scelle la fin de la prédominance des scientifiques « de gauche », au profit des ingénieurs polytechniciens. Un décret ministériel du 3 janvier 1951 modifie l'ordonnance de 1945 afin d'autoriser l'accès au Comité à l'énergie atomique à des personnalités de l'administration et de l'industrie, et non plus aux seuls scientifiques reconnus pour leur compétence dans le domaine atomique. Le 9 juillet de la même année est actée une décision suivant laquelle les collaborateurs du CEA peuvent être licenciés par l'administrateur général seul, sans avis du haut-commissaire.⁵⁵ L'administrateur général, l'homme des réseaux des services secrets et du complexe militaro-industriel, prend le pas sur le haut-commissaire.

commissaire. Note de Service C-946, Instruction générale, du 26.11.64, signée F. Perrin et R. Hirsch. Archives CEA.

⁵⁵ D'après Vallet, Bénédicte, « The Nuclear Safety Institution in France : Emergence and Development », *Dissertation pour le grade de docteur en philosophie de l'Université de New York*, 1986, p. 43.