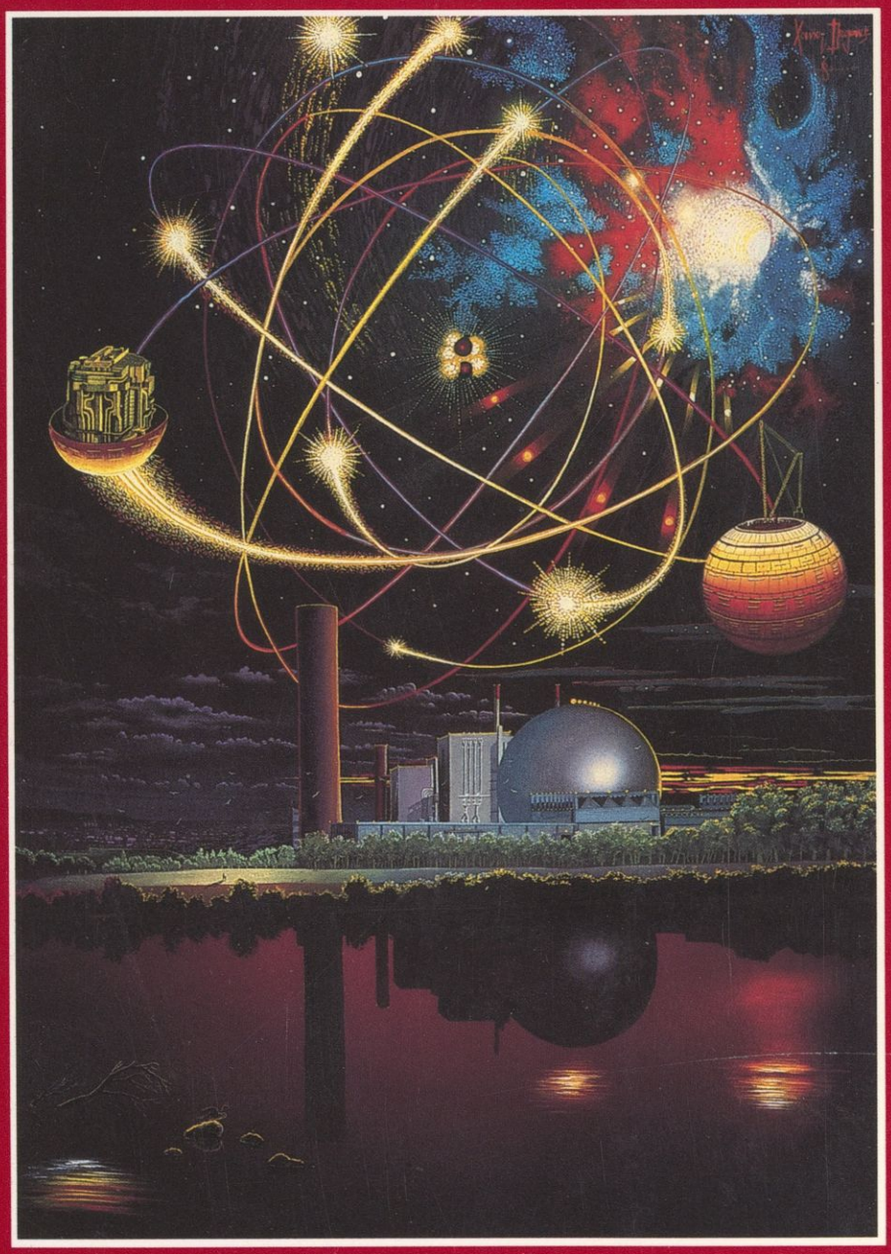
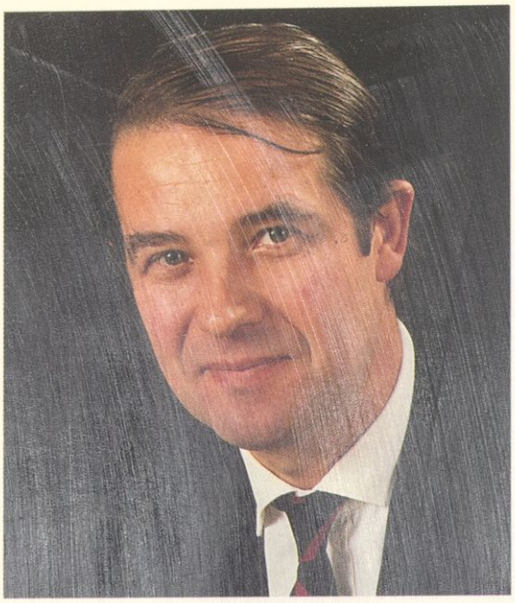
Jacques Leclercq

L'ERE NUCLEAIRE



le monde des centrales nucléaires

HACHETTE



Jacques LECLERCQ, né en 1942, est ancien élève de l'École polytechnique et ingénieur en chef du corps des Ponts et Chaussées.

De 1968 à 1974, comme conseiller technique dans plusieurs cabinets ministériels, il est chargé des questions de financement et de planification des investissements. A ce titre, il a l'occasion de participer au comité interministériel du 6 mars 1974 où la décision fut prise, à la suite de la hausse massive des prix des produits pétroliers, de lancer le programme nucléaire français sur une grande échelle.

Entré à Électricité de France quelques mois plus tard, il participe depuis lors directement à la mise en service du programme. Tout d'abord, sur le terrain comme «chef d'aménagement», au démarrage des travaux de la centrale nucléaire du Blayais en Gironde, puis, dans le Nord, à la tête du chantier de six tranches de Gravelines, au couplage début 1980 de la première tranche.

Il est ensuite, à Lyon, comme directeur d'une «région d'équipement», chargé des études et des travaux de plusieurs centrales, dont Creys-Malville, le plus grand surgénérateur couplé au réseau.

De 1984 à 1987, il dirige la production thermique, service responsable notamment de l'exploitation du parc nucléaire le plus important du monde, avec cinquante tranches en fonctionnement.

674858

L'ÈRE NUCLÉAIRE

4°V
47829

DL-22021989-03191

pour Jeanine, Aurore et Éric

© Sodel 1988

Cet ouvrage est réalisé par les Éditions du CHÊNE et distribué par HACHETTE.

12014
62

Jacques Leclercq

L'ÈRE NUCLÉAIRE

Avec la collaboration
de Michel Durr

Préface de Marcel Boiteux



aquarelles originales de Xavier Degans



Le débat nucléaire pouvait paraître définitivement clos, en France du moins. La grande fièvre née du premier choc pétrolier de 1973 était peu à peu retombée. Et même le trouble qu'avait jeté l'incident survenu en 1979 à la centrale américaine de Three Mile Island s'était, semble-t-il, effacé des mémoires. En un sens, le fait qu'un incident aussi grave — de l'avis même de tous les experts — n'ait fait ni victimes ni dommages à l'environnement était plutôt réconfortant. Même si le choc avait été rude, surtout aux États-Unis, ses répercussions ne semblaient pas devoir se prolonger outre mesure : la psychose du syndrome chinois paraissait bel et bien en voie de guérison, et les médias comme le public ne portaient plus qu'un œil distrait aux performances, à l'évidence satisfaisantes, qu'affichaient les quelque 375 réacteurs en fonctionnement dans le monde en 1985.

Profitant de l'accalmie, l'industrie nucléaire mondiale donnait même quelques signes de reprise. Les discussions allaient bon train chez nos voisins allemands, italiens, suisses, néerlandais, qui manifestaient une volonté de plus en plus nette d'aller à nouveau de l'avant dans la poursuite de leurs programmes nucléaires. Quant à la France, avec d'autres pays dans son sillage, elle n'avait guère été ébranlée par l'incident américain, et rien ne semblait devoir contrarier le consensus quasi général qui lui avait permis de poursuivre son programme au plus fort de la tempête.

Survient l'accident de Tchernobyl, au printemps 1986. Première catastrophe du nucléaire civil, avec ses premières victimes. L'événement frappe sans doute par le nombre déjà annoncé des morts et des blessés, bien moindre pourtant que celui des accidentés de la route en France en ce même mois de mai 1986... ; il frappe surtout par l'étendue de ses conséquences potentielles, à la fois dans l'espace et dans le temps.

Qu'à des milliers de kilomètres du lieu, on ait pu à la fois détecter l'événement, en soupçonner la gravité et en craindre les

effets, aussi infimes fussent-ils, démontrait l'ampleur du drame écologique. Qu'au plan sanitaire, les nuisances de la radioactivité puissent ne pas être immédiatement décelées plongeait des millions d'individus dans l'angoisse.

Pourtant, cette dimension temporelle et planétaire du risque technologique n'est pas l'apanage du nucléaire : l'industrie pétrolière pour ne citer que les marées noires, l'industrie chimique et ses redoutables poisons, l'industrie charbonnière avec ses panaches acides et ses légions de silicosés, toutes ces activités nous avaient déjà alertés. Mais nous semblions non seulement avoir admis ces risques, parfois avec une certaine négligence, mais toléré aussi leurs effets les plus concrets — et les plus tragiques — à l'échelle de la planète et pour plusieurs générations.

Tchernobyl pourrait, en un sens, être le tribut à payer par une industrie que le sort avait épargnée jusqu'alors. Car la contrepartie de ce tribut, ce sont toutes les vies sauvées grâce au nucléaire, ne serait-ce que dans les mines de charbon. Et pourtant, Tchernobyl va suffire à relancer toutes les polémiques d'hier. D'où vient donc cette sensibilité particulière du grand public à la question nucléaire ?

Paradoxalement, la nuisance radioactive est infiniment plus détectable que toute autre, et ses effets, contrairement à une opinion assez communément répandue, sont beaucoup mieux connus. Ceci explique peut-être cela. L'extrême sensibilité des mesures de radioactivité aura, en Europe, des conséquences tout à fait inattendues lors de l'accident de Tchernobyl : sur la foi des indications fournies par les appareils de surveillance de ses propres centrales, tel pays interdira la vente ou l'importation de fruits et de légumes frais, tel autre recommandera l'ingestion préventive de tablettes d'iode ; dans certaines contrées on ira jusqu'à fermer les jardins publics, et des tonnes d'épinards et de lait frais seront jugées impropres à la consommation... Autant de mesures disproportionnées, aux motivations souvent étranges, parfois peu avouables, qui ne feront que semer le doute et engendrer la confusion.

Que, par une règle de trois, on traduise immédiatement une augmentation du taux de radioactivité naturelle en quelques cancers surajoutés par million d'habitants a de quoi faire frissonner ; et pour peu que l'annonce de ces cancers potentiels s'assortisse de celle de quelques malformations congénitales menaçant les générations futures, la panique est déclenchée !

A cela s'ajoutent les querelles d'experts, la tendance mal surmontée de certains responsables à la rétention d'information, le goût des médias pour le sensationnel. Comment dans ces conditions démontrer l'absurdité de telle ou telle mesure de protection ? Comment apaiser les craintes dans un univers mouvant d'incertitudes ?

Tchernobyl, tout comme Three Mile Island, aura mis en évidence la profondeur du fossé qui sépare encore le monde des « initiés » (experts, scientifiques, ingénieurs...) de celui du public.

Le fait que 350 millions d'Européens aient été tenus en haleine, pendant plusieurs semaines, au rythme du flux et du reflux d'un « nuage » radioactif qu'accompagnait le brouillard des déclarations contradictoires, démentis, fausses nouvelles et supputations les plus fantaisistes, démontre à l'évidence la difficulté des uns et des autres à communiquer ensemble.

Dans un domaine aussi complexe et pointu que le nucléaire, la connaissance reste encore, quoi qu'on dise et quoi qu'on ait fait, le privilège d'une minorité. Dès lors, qu'à l'occasion d'un accident l'irrationnel l'emporte sur la raison n'a rien d'étonnant.

Mais que faire alors ?

En publiant aujourd'hui « l'Ère nucléaire », l'intention de Jacques Leclercq n'est pas, j'en suis sûr, de « coller » à l'actualité : il s'agit à l'évidence d'un ouvrage préparé de longue date, comme en témoignent l'abondance et la richesse des documents qu'il contient.

Pourtant, ce livre vient à son heure : car, sans céder à la tentation d'exploiter le caractère sensationnel de l'accident de Tchernobyl, l'auteur nous donne tous les moyens de l'interpréter et d'en évaluer l'importance. La sûreté et la protection de l'environnement tiennent dans l'ouvrage une place importante : c'est précisément le domaine auquel le public est le plus sensible, et où le besoin d'une information claire et complète est permanent.

Jacques Leclercq n'a pas voulu limiter sa perspective au problème, certes fondamental, de la gestion du risque nucléaire : c'eût été singulièrement restreindre le champ de vision du lecteur, et admettre, d'une certaine manière, que le nucléaire ne devait s'apprécier qu'en termes de dangers. Malgré une procréation malheureuse sous le signe d'Hiroshima, le nucléaire n'ouvre pas

une ère maudite, tant s'en faut ! Et le risque, aussi faible soit-il, serait inacceptable s'il n'était assorti d'une large contrepartie.

Car l'ère nucléaire, c'est aussi l'aboutissement d'une longue marche, faite d'espoirs et de chimères, vers la domestication d'énergies de plus en plus abondantes, de plus en plus propres, faciles d'emploi et économiques. Avec elle s'ouvre devant l'humanité la perspective, combien réconfortante, de se libérer enfin de la contrainte d'approvisionnement en énergie, cette contrainte qui a si lourdement pesé sur son histoire jusqu'aux périodes les plus récentes.

Et lorsque Jacques Leclercq démonte à notre intention ces centrales nucléaires que le génie humain s'est appliqué à forger, morceau par morceau, au rythme d'innombrables découvertes, tâtonnements et compromis, on comprend mieux tout le chemin parcouru. Depuis la première transmutation de l'atome par lord Rutherford, en 1919, jusqu'à nos réacteurs d'aujourd'hui, quoi de plus passionnant que cette évolution pas à pas des connaissances, celle-là même qui a permis à nos sociétés, depuis les temps les plus reculés, de relever les défis qui leur étaient lancés... pour en voir surgir d'autres, d'ailleurs tout aussi provocants.

Destiné à satisfaire la curiosité de ceux qui veulent en savoir plus, l'ouvrage est ainsi conçu comme une sorte de guide pour tous, guide d'un voyage dans le temps et dans l'espace, au fil des péripéties de l'histoire du nucléaire comme à travers le dédale de ces grands ensembles industriels que constituent les centrales et les usines qui y sont associées.

Qui d'autre que l'ancien chef du chantier de construction de la centrale nucléaire du Blayais (Gironde), aujourd'hui responsable de l'exploitation d'une quarantaine de réacteurs, pouvait mieux nous livrer les secrets d'une technique de plus en plus présente dans la satisfaction des besoins de notre vie quotidienne ?

Si l'énergie nucléaire s'impose aussi facilement comme source d'énergie dans nos usines, dans nos foyers, n'est-ce pas la preuve qu'à travers l'électricité, elle répond mieux que toute autre aux exigences de qualité des consommateurs ? La contrepartie de cette qualité croissante, c'est une complexité toujours plus grande du processus industriel apte à transformer la matière première que nous offre la Nature en un produit hautement élaboré.

Rançon du progrès, cette complexité suscite inquiétudes et interrogations. Mal assumée, elle engendre un certain désarroi. Face à une technique dont le sens et la finalité lui échappent, l'homme a tendance à se replier sur lui-même, à refuser tout changement.

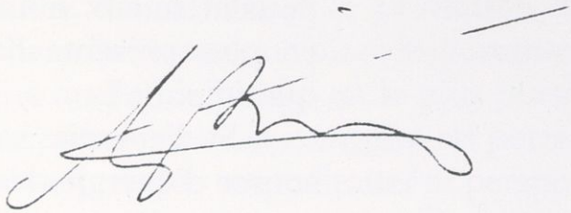
L'attitude n'est pas nouvelle. Chacune des grandes étapes du progrès technique s'est imposée à travers un concert de protestations : les craintes provoquées au siècle dernier par l'apparition des premiers chemins de fer, craintes qui font sourire aujourd'hui, ne sont pas bien différentes dans leur essence de celles des opposants actuels au nucléaire.

A travers une technique plus complexe, c'est aussi l'interdépendance accrue entre les hommes, et donc l'acceptation d'un risque maîtrisé par d'autres que soi, qui sont ressenties comme une aliénation. Nos sociétés industrielles sont ainsi faites qu'elles reposent de plus en plus sur une solidarité obligatoire, qui requiert la confiance.

Cette confiance, après quelques péripéties, l'industrie nucléaire semblait peu à peu l'avoir gagnée. Même si l'éventualité d'un accident grave n'était pas écartée, le public avait admis que le jeu en valait la chandelle. En sera-t-il toujours ainsi après Tchernobyl, et dans le futur, si d'autres accidents se produisent ?

La confiance ne se décrète pas. Elle se gagne lentement, pas à pas, non seulement par des résultats probants, mais aussi par le dialogue, l'information, la compréhension mutuelle, en un mot par la communication entre les hommes. L'ouvrage de Jacques Leclercq devrait grandement y contribuer.

Paris, Septembre 1986



Président du Conseil d'administration
d'Électricité de France

Deux ans ont passé depuis la première édition de cet ouvrage, paru quelques mois à peine après l'accident survenu en Union soviétique. L'accueil que le public et les milieux professionnels ont bien voulu réserver aussi bien en France à la version française que dans le reste du monde, à la version anglaise, a rendu nécessaire un nouveau tirage.

Pour l'essentiel, peu de modifications auront été apportées car l'objet de ce livre n'était pas, sous une autre forme, de redémontrer l'intérêt du nucléaire. Son but est de faire comprendre la progression et les efforts d'acteurs divers qui réussissent à assembler des techniques complexes pour mettre au point des installations parmi les plus fiables et les plus économiques ; ce faisant, d'intéresser, par l'image autant que par le texte, le lecteur au monde des sciences et des techniques. Aussi, au-delà de la mise à jour des données chiffrées, n'ai-je ajouté que deux compléments : d'une part un « dossier Tchernobyl », d'autre part une mise au point sur les « bases radiologiques de la radioprotection », dûe au professeur Maurice TUBIANA, membre de l'Académie de médecine et de l'Académie des sciences, que je remercie vivement.

Cela dit, actuellement en tout cas, le contexte a changé et le développement de cette énergie rencontre de sérieuses difficultés. Comme le notait Rémy Carle, directeur général adjoint d'Électricité de France, au congrès de mai 1988 de l'Union internationale des producteurs et distributeurs d'électricité, « cette situation est paradoxale, puisqu'au même moment :
– la production annuelle mondiale d'électricité atteint un niveau record de l'ordre de 1 650 TWh, dans d'excellentes conditions de fiabilité et d'économie ;
– le développement de ce type d'énergie est ralenti, sinon stoppé dans de nombreux pays ».

Pourtant, il est sûr, dans une vision à moyen terme, qu'il sera à nouveau nécessaire de faire une place au nucléaire dans les programmes d'équipement des pays occidentaux. C'est ce que font d'ailleurs tant le Japon que l'Union soviétique. En effet, tout ce qui a été dit sur le pétrole, le gaz, le charbon et les énergies nouvelles, et leur insuffisance à couvrir l'ensemble des besoins futurs, demeure vrai.

Puisse, je l'espère, cette nouvelle édition contribuer à expliciter toutes les données de l'énergie nucléaire et à atténuer, sinon désarmer, une hostilité trop souvent excessive vis-à-vis de cette industrie.

Jacques LECLERCQ

SOMMAIRE

Préface 4
Avant-propos 9

1/ L'énergie nucléaire dans sa perspective historique 13

1/ L'aube de l'ère nucléaire 14
2/ De la guerre à la paix : la bombe et l'électricité 24
3/ Les premières centrales nucléaires 30
4/ La percée économique 36
5/ Un avenir ouvert et diversifié 50

2/ La diversité des filières 69

6/ Le monde des réacteurs 70
7/ L'eau lourde : la filière canadienne 72
8/ Les réacteurs modérés au graphite : une longue expérience 80
9/ Les réacteurs à haute température : le pari allemand 88
10/ L'eau bouillante : un challenger vigoureux 92
11/ L'eau sous pression - le leader mondial 100
12/ Les réacteurs à neutrons rapides - réacteurs de demain 114
13/ La fusion contrôlée : quel avenir industriel ? 122

3/ Sûreté et environnement 127

14/ Énergie nucléaire et opinion 128
15/ La maîtrise de la fission 134
16/ L'évolution des idées de sûreté 138
Le dossier Tchernobyl ..... I à VIII
17/ L'organisation de la sûreté nucléaire 152
18/ Les rayonnements ionisants et leurs effets biologiques 156
19/ Protéger l'homme 164
20/ Protéger l'environnement 170

4/ Architecture et grands travaux 181

21/ Les cathédrales du XX^e siècle 182
22/ Le pari architectural - l'expérience française 194
23/ L'insertion dans le site 202
24/ Les grands volumes du plan de masse 210
25/ La vie des chantiers 228

5/ La mise en œuvre des machines et matériels 237

26/ Les grands composants 238
27/ La mécanique de précision 256
28/ L'interdépendance des éléments 264
29/ L'art de l'ingénieur 274

6/ Le combustible nucléaire 283

30/ Le cycle du combustible 284
31/ De la mine à l'hexafluorure d'uranium 288
32/ L'enrichissement de l'uranium 302
33/ Un art nouveau, la fabrication des combustibles nucléaires 308
34/ Transport et retraitement du combustible 318
35/ Le stockage des déchets 322

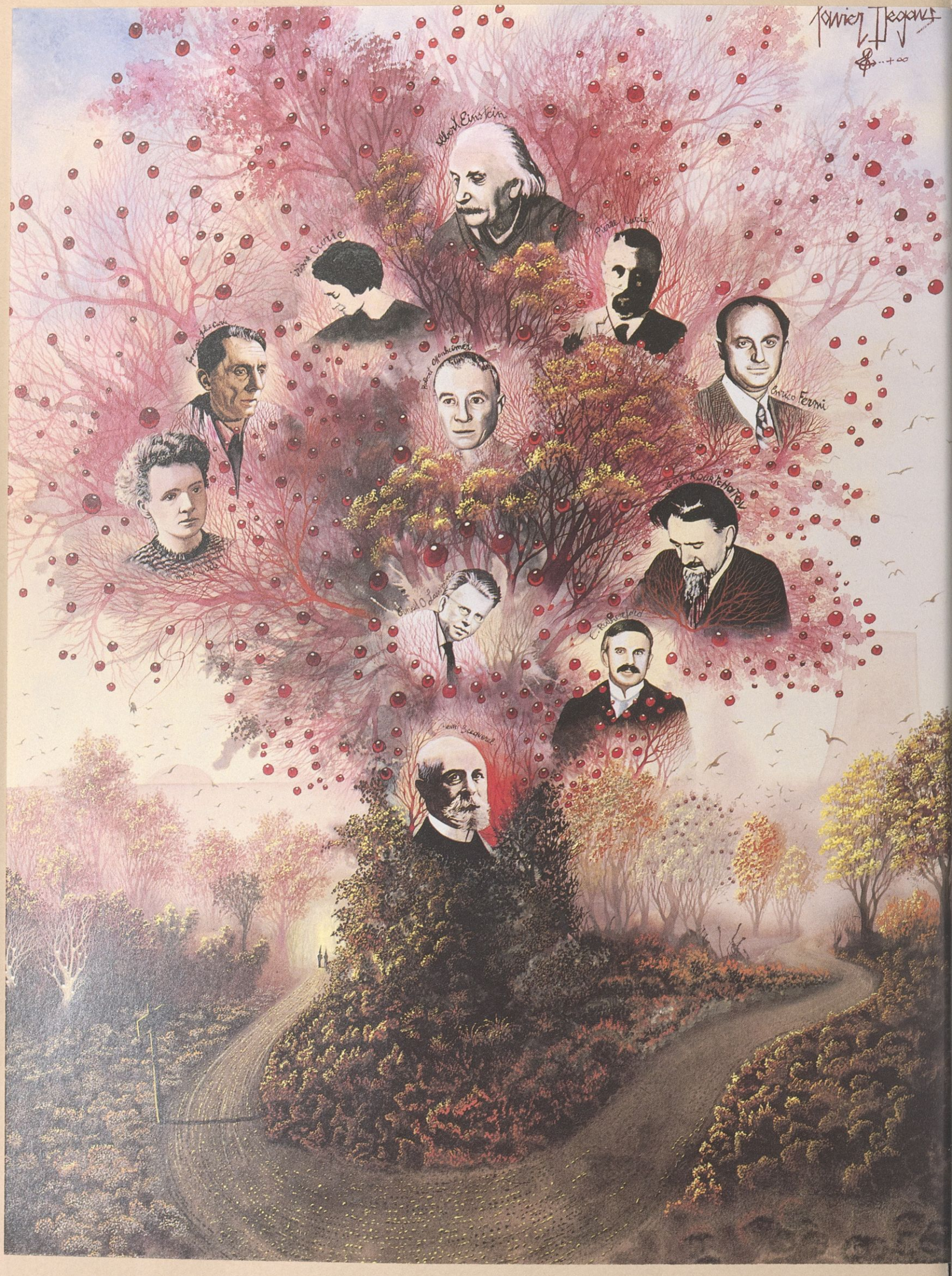
7/ Au service de l'électricité 329

36/ Les hommes qui exploitent les centrales 330
37/ Au-delà de la centrale 340
38/ L'appréciation du service rendu 352

Addendum Les bases biologiques de la radioprotection par le Professeur TUBIANA, membre de l'Académie des Sciences et de l'Académie de Médecine 364

Annexes 377

Liste des illustrations 416
Liste des abréviations utilisées 423
Index des noms de personnes 425
Index des noms de lieux, de centrales nucléaires et d'installations 426
Glossaire 429


Albert Einstein
Pierre Curie
Enrico Fermi
Henri Becquerel

1 l'énergie nucléaire dans sa perspective historique

La première électricité nucléaire fut produite en 1951 sur un réacteur américain à neutrons rapides; les premières centrales furent mises en service vers 1955: Obninsk en Union soviétique, Shippingport aux États-Unis, Calder Hall en Grande-Bretagne et Marcoule en France. Trente ans plus tard, 13 % de l'électricité du monde sort de 370 centrales nucléaires; la pénétration de cette énergie nouvelle se poursuivra pour atteindre 20 % en l'an 2000.

Cette émergence a deux causes: les découvertes fondamentales de la science physique du début de ce siècle jusqu'à 1940; les travaux de recherche et développement intensifiés par l'effort de guerre, qui ont conduit à la mise en œuvre d'une arme décisive et préparé la voie de l'utilisation pacifique de l'atome.

A la suite des « crises du pétrole », l'énergie nucléaire se développe à des rythmes différents selon les pays, malgré sa compétitivité. Diverses analyses seront proposées pour comprendre les retards ou les oppositions, mais il faut observer que la volonté politique des États est un facteur majeur de réussite. Aujourd'hui, dans ce domaine, l'Europe a dépassé les États-Unis et la France est devenue la seconde puissance électronucléaire du monde, avec un ensemble de centrales qui produiront en 1990 les trois quarts de l'électricité, soit le tiers des besoins du pays en énergie.

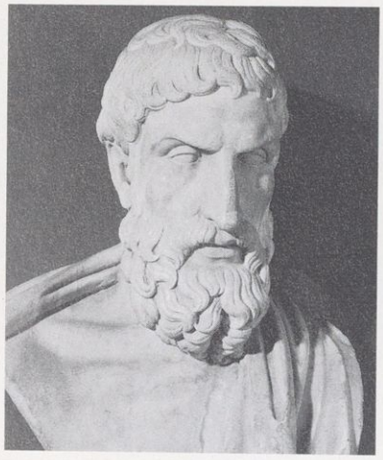
La structure des atomes

Il y a deux cents ans, la notion d'atome n'est encore que l'intuition géniale de philosophes grecs comme Démocrite, Leucippe, Épicure. Reprise par Gassendi, elle se révèle bien adaptée pour expliquer les propriétés chimiques des corps et triomphe avec les travaux de Dalton, Gay-Lussac, Ampère, Avogadro et de leurs successeurs. La matière est un assemblage de corpuscules élémentaires dont les combinaisons caractérisent les diverses espèces chimiques : elle se résout en atomes, insécables, immuables, éternels. La fin du XIX^{e} siècle et l'aube du XX^{e} vont approcher la structure même de ces atomes et bouleverser les bases philosophiques qui les avaient fait concevoir. Après les travaux de Sir Joseph Thomson, découvreur de l'électron (1897), de Rutherford, de Niels Bohr (1913), de Bothe et de Chadwick (1931), la représentation désormais classique de l'atome s'impose. Elle nous suffira tout au long de cet ouvrage, même si les modèles les plus récents fractionnent les neutrons et les protons qui composent les noyaux en particules encore plus petites, les quarks.

Les atomes des corps sont représentés comme des systèmes solaires en miniature : un cortège d'électrons chargés négativement tourne autour d'un noyau central, lui-même assemblage de protons chargés positivement et de neutrons sans charge électrique. La charge totale d'un atome non ionisé est nulle ; il comporte autant de protons que d'électrons. Ces derniers sont responsables des propriétés chimiques des corps.

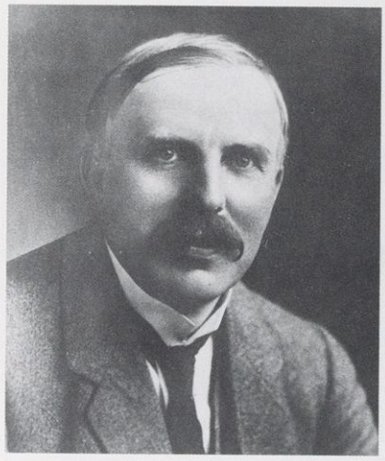
Le nombre de protons du noyau (le nombre atomique) va de 1 pour l'hydrogène à 92 pour l'uranium ; au-delà de 92, il s'agit de radioéléments artificiels qui n'existent pas dans la nature. Le nombre atomique caractérise les corps simples, les éléments chimiques. Les noyaux des atomes d'un même élément ont toujours le même nombre de protons, mais peuvent différer par le nombre de neutrons. Ce sont les isotopes d'un même corps. Ainsi l'élément hydrogène se présente sous la forme de trois isotopes : l'hydrogène ordinaire (1 proton), l'hydrogène lourd ou deutérium (1 proton + 1 neutron), le tritium (1 proton + 2 neutrons), radioactif.

1.1



1.1 ***Épicure*** *(341-270 av. J.-C.) : philosophe grec. Continuateur de Démocrite et de Leucippe, Épicure développe leur conception de la matière. La coexistence dans l'être de l'un et du rien, de l'atome et du vide, explique tous les phénomènes. Indivisibles, inaltérables, éternels, les atomes ont trois qualités : figure sous laquelle ils se présentent, grandeur, toujours déterminée, pesanteur.*

1.2

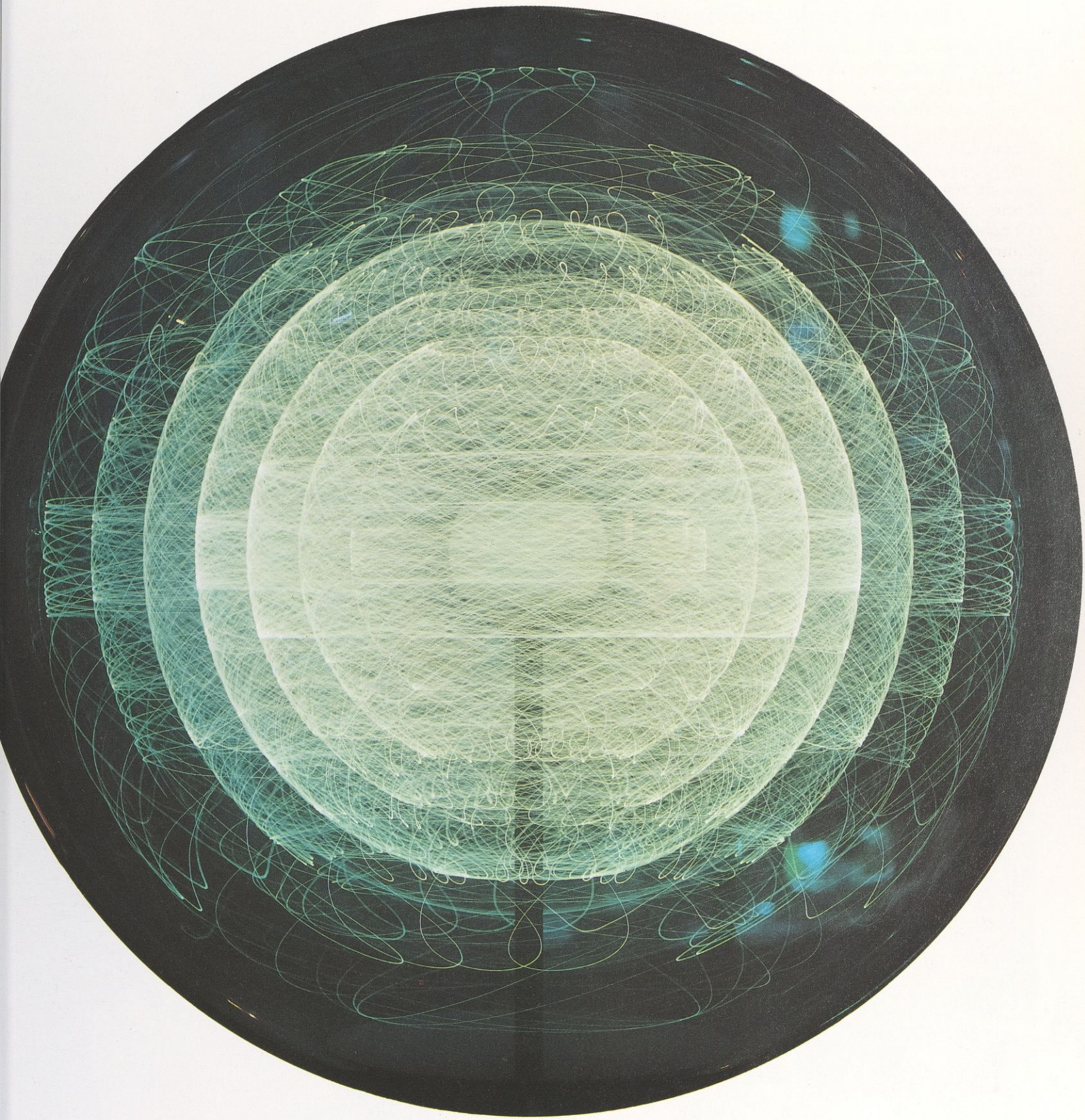


1.2 ***Ernest Rutherford*** *(1871-1937) : Prix Nobel de Chimie en 1908. Il établit en 1903 avec Soddy la loi de décroissance de la radioactivité, identifie les rayonnements alpha avec l'émission de noyaux d'hélium et montre en 1911 que la charge positive des atomes est concentrée en un petit volume, le noyau. Plus tard en 1919, utilisant comme projectiles des particules alpha, il obtient la première transmutation provoquée, celle de noyaux d'azote en oxygène.*

1.3



1.3 ***Niels Bohr*** *(1885-1962) : physicien danois, Prix Nobel de Physique en 1922. Il applique en 1913 la théorie des quanta au modèle d'atome de Rutherford et donne du noyau et des électrons la représentation planétaire devenue classique. En 1936, il fait la théorie des phénomènes de désintégrations nucléaires en utilisant, pour représenter le noyau, le modèle de la goutte liquide.*



1.4

1.4 Modèle d'un atome d'uranium 235,
réalisé par Union Carbide - New York.
Sous la vision artistique des trajectoires
des électrons, on entrevoit le noyau d'uranium.
Fait sans souci des proportions, ce modèle
visualise les niveaux d'énergie des électrons.

Histoire de la radioactivité

Avant même que l'indivisibilité de l'atome soit battue en brèche, c'est son caractère d'immuabilité dans le temps que le physicien Becquerel a remis en cause dès 1896. Il étudiait la fluorescence des sels d'urane sous l'action des rayons du soleil et observa que même en l'absence d'exposition préalable à la lumière, et donc de fluorescence induite, ces sels étaient capables d'impressionner une plaque photographique par émission de «rayons uraniques». L'étude de ces rayons soumis à l'action d'un champ magnétique mit en évidence trois types de rayonnements :

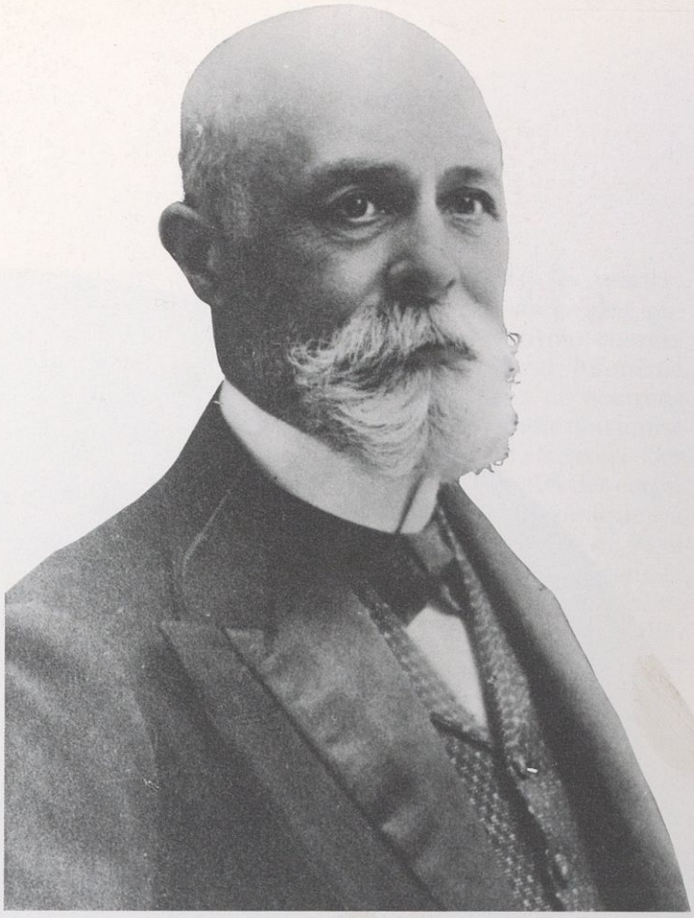
– Rayons alpha chargés positivement, peu pénétrants, que Ramsay et Soddy identifieront avec des noyaux d'hélium ;

– Rayons bêta chargés négativement, que J.J. Thomson et Maurice de Broglie montreront comme étant des électrons ;

– Rayons gamma immatériels, de même nature que la lumière ou les rayons X mais plus pénétrants et plus chargés d'énergie.

Tous ces rayonnements ont la propriété d'ioniser la matière qu'ils traversent, c'est-à-dire d'arracher des électrons aux atomes voisins de leur trajectoire. Leurs effets peuvent être nocifs sur les êtres vivants et il est nécessaire de s'en protéger. C'est tout le problème de la radioprotection.

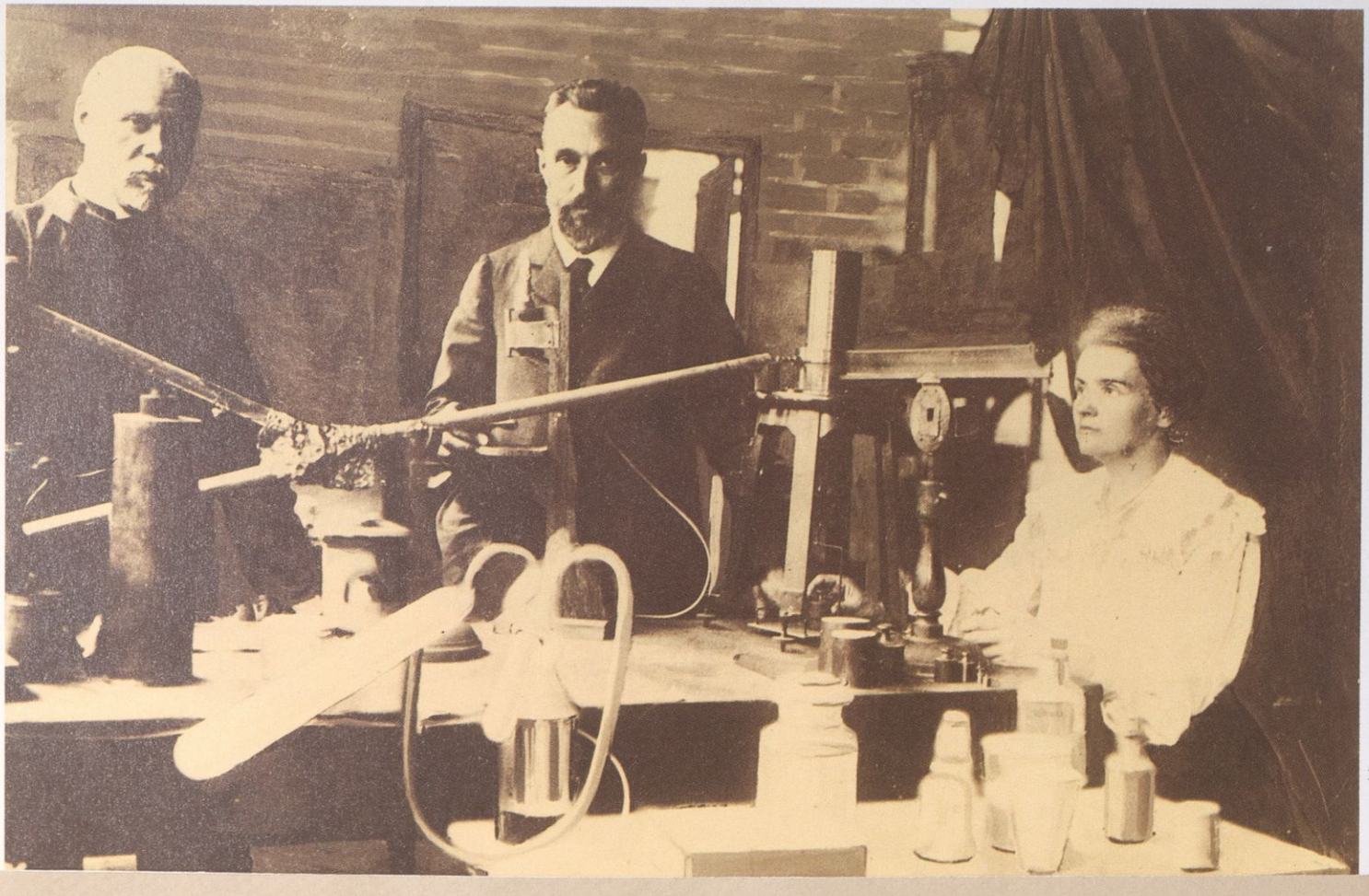
Poursuivant les travaux de Becquerel, Pierre Curie et sa femme Marie Sklodowska isolent de plusieurs tonnes de résidus de pechblende (minerai d'uranium provenant des mines de Joachimsthal en Bohême) deux corps nouveaux, le polonium et le radium (décembre 1898), tous deux émetteurs puissants de particules alpha.



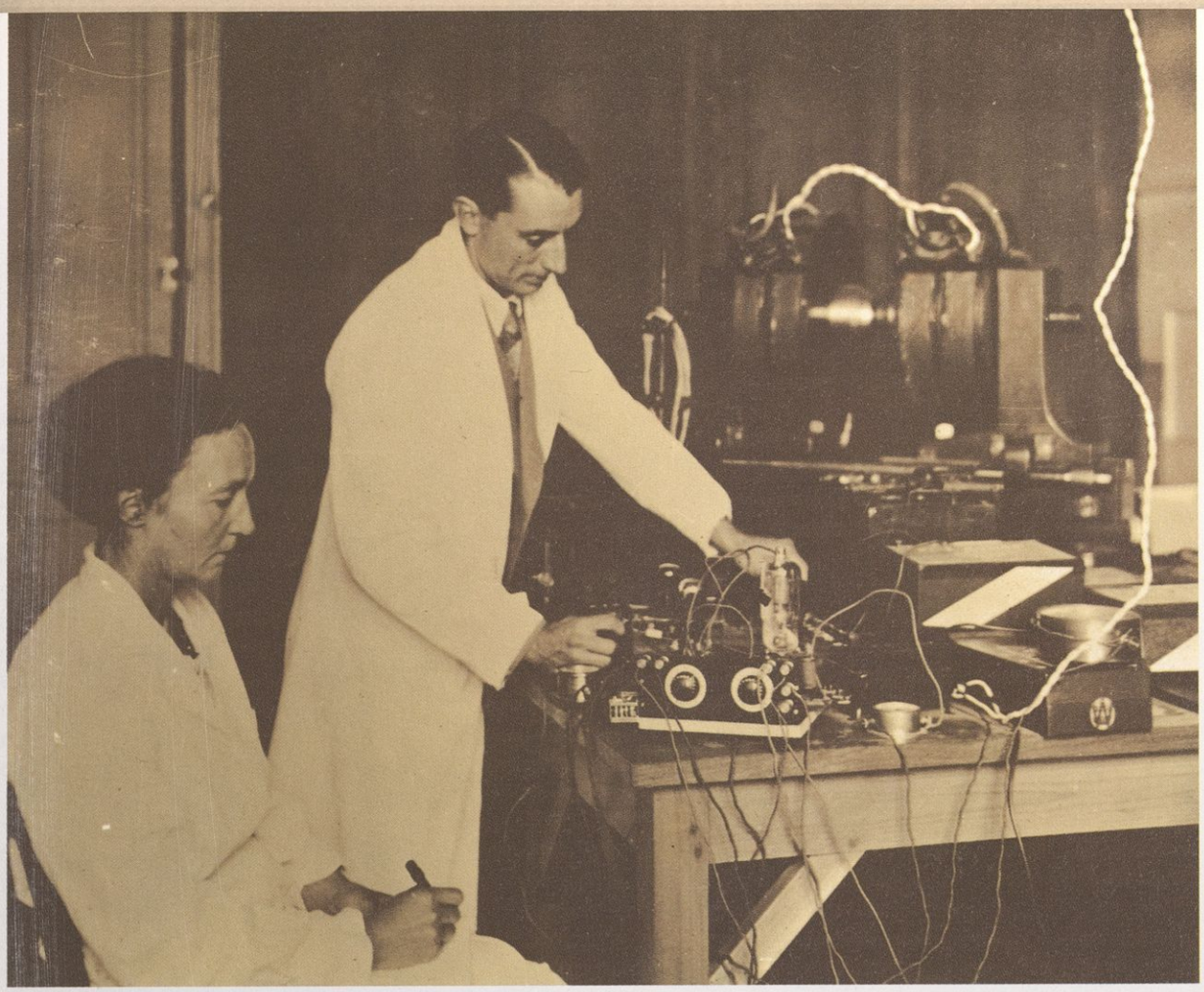
1.5

1.5 ***Henri Becquerel*** *(1852-1908) : physicien français, fils et petit-fils de physiciens. Sa découverte en 1896 de la radioactivité naturelle des sels d'urane est à l'origine des travaux de Pierre et Marie Curie avec qui il partage le Prix Nobel de Physique en 1903.*

1.6 Pierre et Marie Curie au travail dans leur laboratoire *: c'est dans un hangar mis à leur disposition dans la cour de l'École de Physique et de Chimie de Paris que Marie Sklodowska (1867-1934) et son mari Pierre Curie (1859-1906) isoleront de plusieurs tonnes de pechblende deux corps nouveaux, le polonium et le radium, après des mois d'un travail exténuant.*



1.6



1.7

1.7 Frédéric Joliot et sa femme Irène Curie : dans leur laboratoire de l'Institut du radium, les découvreurs de la radioactivité artificielle sont photographiés alors qu'ils détectent avec un compteur à fil les rayonnements émis par les radioéléments artificiels qu'ils ont fabriqués.

A la découverte du neutron

Dans un bouillonnement d'idées fécondes, les savants des années 30 vont jeter bas la notion d'atome indivisible. Imaginé par Rutherford, mis en évidence par Chadwick à la suite d'expériences faites par Frédéric Joliot et Irène Curie, le neutron va leur fournir le projectile capable de bouleverser les structures des noyaux. Cela commence par la découverte de la radioactivité artificielle : Joliot crée un nouveau corps radioactif, un isotope du phosphore, en bombardant une feuille d'aluminium par une source de neutrons. Enrico Fermi, à Rome, expose les uns après les autres tous les corps connus à une telle source. Détail curieux, c'est le voisinage de son laboratoire et de l'Hôpital général de Rome qui le lui permet : l'hôpital dispose d'un gramme de radium pour ses besoins médicaux, et toutes les nuits Fermi place sous une vessie ce radium dont il capte l'émanation, le radon, gaz radioactif, puissant émetteur de particules alpha. Celles-ci sont capables d'arracher des neutrons à une lamelle de béryllium qui devient la source des expériences de Fermi. Désireux d'aller plus loin que la nature, Fermi soumet à ce flux de neutrons des sels d'uranium, l'élément le plus lourd connu alors. Il espère obtenir un élément nouveau, plus lourd encore, au-delà de tous les éléments existant dans la nature. Les résultats de l'expérience sont si complexes et contradictoires qu'ils ne convainquent pas de la création d'un nouvel élément. Irène Joliot-Curie, femme de Frédéric Joliot et fille de Pierre et Marie Curie, parvient, au terme de patientes analyses, à identifier avec certitude un des corps formés pour être un lanthane, un corps moins lourd que l'uranium.

L'équipe allemande d'Otto Hahn découvre ensuite du baryum dans les produits de la réaction. Fin décembre 1938, Lise Meitner et Otto Frisch expliquent l'expérience de Fermi : les neutrons peuvent casser les noyaux d'uranium. C'est la découverte de la fission nucléaire.



1.8

1.8 Enrico Fermi (1901-1954) : Prix Nobel de Physique en 1938. Le génial physicien italien tient dans ses mains la vessie de porc où il recueille toutes les nuits le radon émis par la source de radium de l'hôpital de Rome. Cette infime quantité lui permettra de soumettre à l'action des neutrons tous les corps connus. L'interprétation des résultats de son expérience sur l'uranium demandera près de cinq ans.



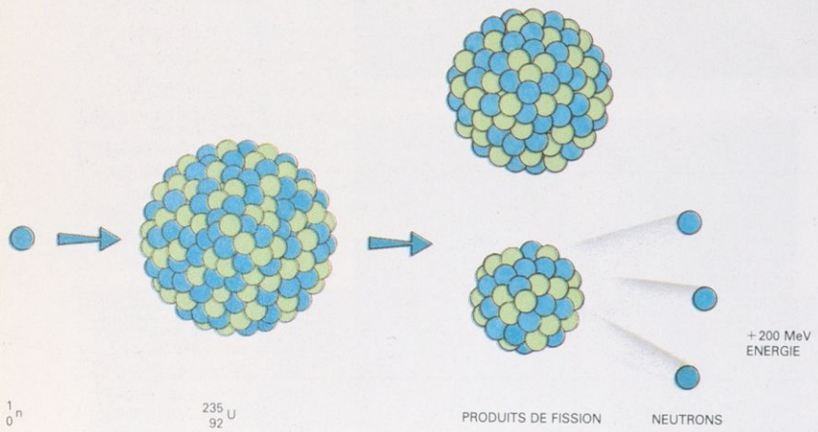
1.9

1.9 Otto Hahn et Lise Meitner inaugurent l'institut de recherches qui porte leur nom à Berlin : avant d'être dispersée, l'équipe de chimistes allemands animée par le professeur Hahn (1879-1968) était une des plus brillantes d'Europe. On lui doit l'interprétation de la fission des noyaux d'uranium. « Unser Chef der Otto Hahn spaltet fleissig das Uran » chantaient en 1938 les étudiants de l'Institut Kaiser Wilhelm de Dahlem. Prix Nobel de Chimie en 1944.



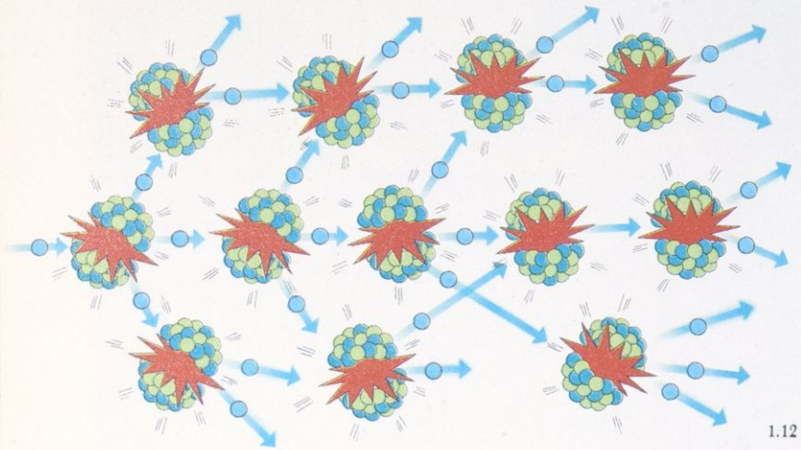
1.10

1.10 ***Frédéric Joliot, Lew Kowarski et Hans von Halban*** *sont filmés en 1947 dans leur laboratoire de 1939, reconstitué pour les besoins du film « La Bataille de l'eau lourde ». C'est là, au Collège de France à Paris, qu'ils découvrirent l'émission de neutrons dans la fission des noyaux d'uranium et qu'ils imaginèrent le principe de la réaction en chaîne.*



1.11

1.11 ***La fission :*** *le phénomène de base. Sous le choc d'un neutron, un noyau d'uranium 235 se brise et libère de l'énergie. Les morceaux du noyau brisé, les produits de fission, sont radioactifs et la fission s'accompagne de la production de trois neutrons identiques à celui qui a cassé le noyau d'uranium 235.*



1.12

1.12 ***La réaction en chaîne :*** *dans un milieu contenant assez d'uranium 235, une réaction en chaîne est possible. Au moins un des neutrons produits dans la fission d'un premier noyau d'uranium retrouve un autre noyau d'uranium 235, le casse, redonne des neutrons dont un retrouve un noyau d'uranium, le casse, etc.*

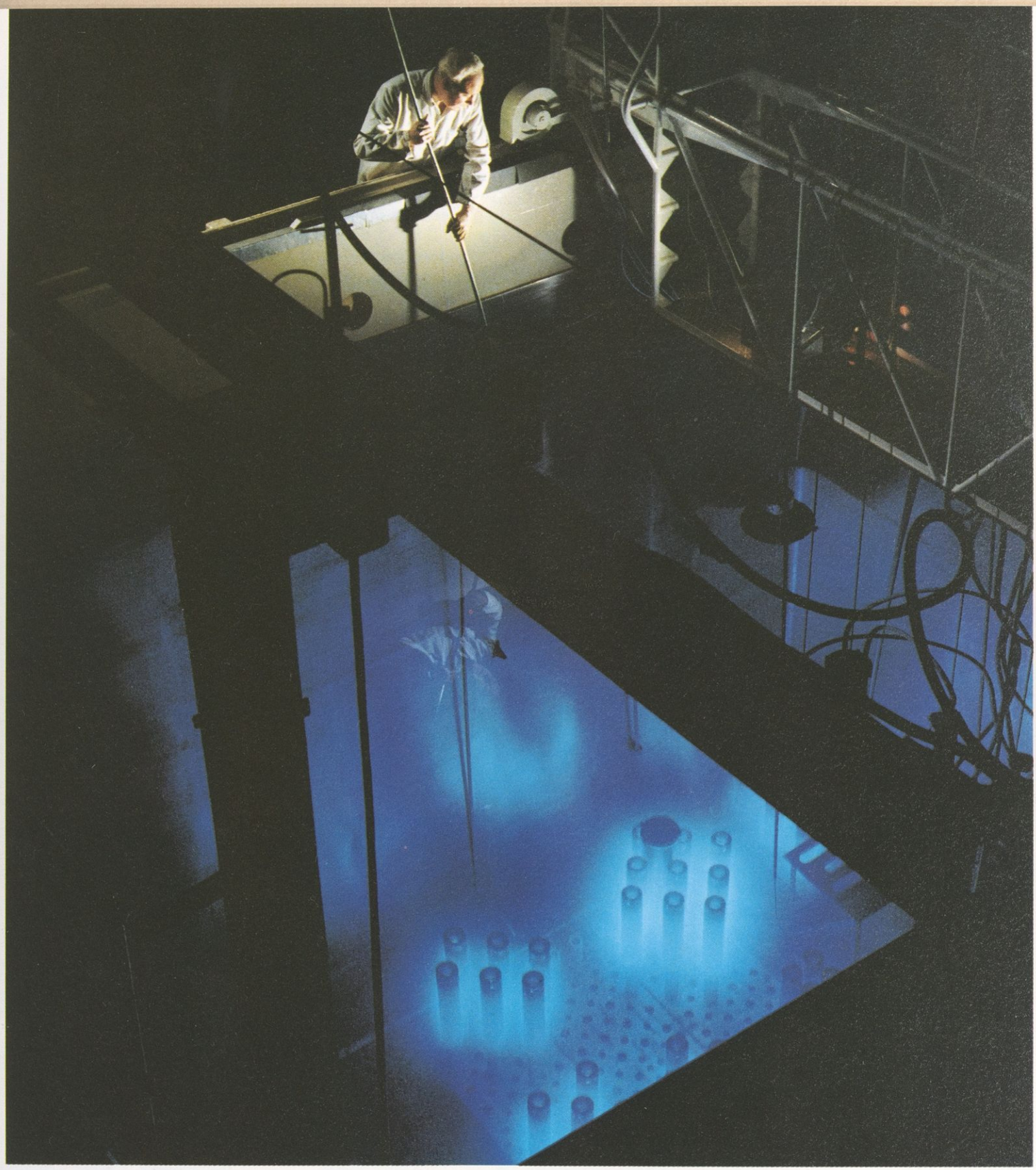
La réaction en chaîne

En janvier 1939, Frédéric Joliot poursuit ses recherches au Collège de France avec Von Halban et Kowarski. Leurs expériences montrent que la fission des noyaux d'uranium se fait avec émission de trois nouveaux neutrons en moyenne. Ils en voient sur-le-champ les conséquences : un premier neutron casse un noyau d'uranium, la fission produit plusieurs neutrons qui à leur tour peuvent casser d'autres noyaux d'uranium, etc. Selon les dispositions adoptées pour réaliser le montage et selon les quantités d'uranium utilisées, on imagine que les neutrons formés peuvent être perdus ; dans ce cas, la réaction provoquée par le neutron initial s'éteindra. Ou, à l'inverse, que d'une génération à l'autre le nombre de neutrons augmente ; on dira alors que la réaction diverge. Enfin, on peut imaginer que seul un des neutrons formés dans la fission casse un nouveau noyau et que l'opération se répète. On obtiendra ainsi une réaction en chaîne entretenue.

La fission du noyau d'uranium s'accompagne d'un dégagement d'énergie important qu'on récupère sous forme de chaleur. Cette énergie correspond à la différence de l'énergie de liaison entre les particules élémentaires qui constituent les noyaux fissiles et la somme des énergies de liaison des particules qui constituent les morceaux. Cela explique que l'énergie récupérée soit du même ordre de grandeur (200 MeV par noyau brisé), qu'il s'agisse d'uranium ou de plutonium qui comportent un nombre de particules voisin. En effet, les morceaux, les produits de fission se retrouvent toujours dans les mêmes zones du tableau de Mendeleïev pour des raisons de stabilité interne de ces noyaux et leurs énergies de liaison sont voisines, comme le sont celles des noyaux de départ. Suivant le principe d'équivalence de la matière et de l'énergie énoncé par Einstein dès 1905, l'énergie nucléaire correspond à la variation de masse entre le noyau initial et la somme des fragments.

A partir de l'uranium, on pourra construire des réacteurs producteurs d'énergie ou des engins explosifs.

Nota : l'électron-volt (eV) est l'énergie d'un électron soumis à un champ électrique de 1 volt. Le MeV est le million d'électron-volts.
1 électron-volt = 1,6 10^{-19} joule.
1 fission = 200 MeV = 3,2 10^{-11} joules.
1 joule = 31 milliards de fissions.
1 joule représente physiquement la chaleur à fournir à 1 gramme d'eau pour élever sa température de 0,24°.
1 kWh électrique produit dans une centrale nucléaire avec un rendement de 30 % demande 3,75 10^{17} fissions (375 millions de milliards de fissions).



1.13

1.13 ***L'effet Cerenkov :*** *vue prise au centre de recherche d'Harwell. La radioactivité est la propriété qu'ont certains corps, ici les produits de fission contenus dans les éléments irradiés du réacteur d'essai Dido, de se transformer spontanément en d'autres corps en émettant des rayonnements, ici des électrons de très grande énergie. Leur vitesse est supérieure à celle de la lumière dans l'eau et leur freinage se fait avec émission d'une magnifique lumière bleue. C'est l'effet Cerenkov, du nom du physicien russe qui expliqua en 1937 ce phénomène observé précédemment en 1929 par Mallet.*

Le principe des réacteurs

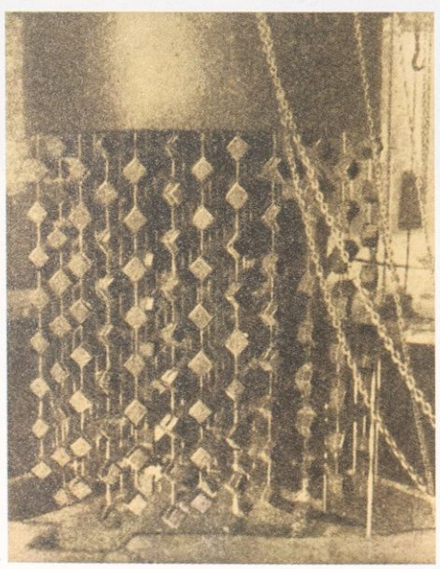
Le chapitre II présente et décrit les diverses catégories de réacteurs. Auparavant, nous donnerons quelques aperçus de leurs grandes familles.

Les réacteurs à uranium naturel ou enrichi

L'uranium naturel, qu'on extrait des mines, est un mélange de deux variétés d'uranium, de deux isotopes : l'uranium 235 en proportion de 0,7 % seulement et l'uranium 238 en proportion de 99,3 %. Les noyaux de ces deux isotopes comportent le même nombre de protons : 92. Ils diffèrent par le nombre de neutrons : 143 pour l'uranium 235 et 146 pour l'uranium 238. Mais leur comportement vis-à-vis des neutrons est différent : l'uranium 235 se brise sous le choc des neutrons ; c'est un phénomène beaucoup plus difficile à obtenir avec l'uranium 238, qui le plus souvent absorbe le neutron qui l'a frappé et après deux transformations radioactives donne un nouveau corps fissile, le plutonium.

Lors de la fission, l'édifice constitué par l'assemblage protons-neutrons de l'uranium 235 est cassé ; il se forme des noyaux nouveaux, radioactifs en général, les produits de fission. Il y a dégagement d'énergie et émission de deux ou trois neutrons selon la façon dont le noyau s'est brisé. L'art du constructeur de réacteur va consister à obtenir, par un arrangement convenable des matériaux fissiles, qu'un de ces neutrons aille casser un autre noyau d'uranium 235, et ainsi de suite. C'est l'entretien d'une réaction en chaîne. La difficulté vient de ce que les matériaux de structure des réacteurs (gaines, supports, etc.) absorbent les neutrons sans donner lieu à fission. Il en va de même pour l'uranium 238.

Lorsque la proportion d'uranium 235 est aussi faible que 0,7 % (cas de l'uranium naturel) on imagine les difficultés de l'entretien de la réaction en chaîne. On y parvient en utilisant la propriété des neutrons ralentis (de faible énergie) de casser plus facilement les noyaux d'uranium 235 que les neutrons rapides et d'être beaucoup moins aisément absorbés par l'uranium 238. Ce ralentissement est obtenu par des chocs successifs sur un milieu qu'on choisit le moins absorbant possible, le milieu modérateur.



1.14

1.14 Le projet qui inquiétait les Alliés - L'eau lourde, premier des modérateurs : l'eau lourde est le premier modérateur qui ait été utilisé. C'était le cas pour ce montage construit en Allemagne à Haigerloch dans le Wurtemberg par l'équipe de Bopp et de Wirtz. Des blocs cubiques d'uranium attachés par des chaînes plongeaient dans un bac d'eau lourde. Ce réacteur ne divergea jamais. Hitler ne croyait heureusement pas à l'intérêt d'une bombe atomique. Il ne donna aucune priorité à ce projet qui inspira tant de craintes au monde libre et stimula l'effort américain.

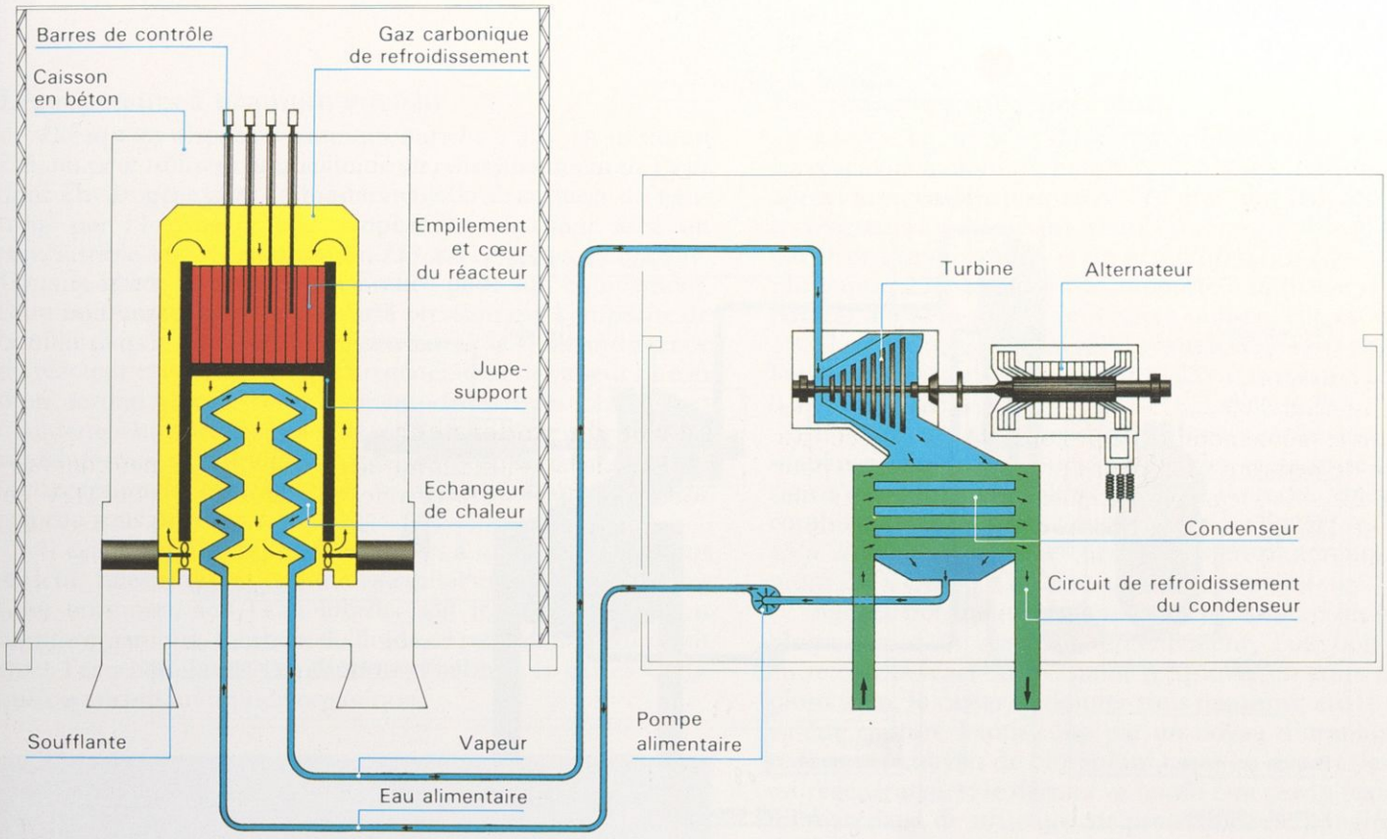
L'énergie nucléaire est produite à l'intérieur de la matière fissile. Il va donc falloir transférer cette chaleur à de l'eau qu'on fera bouillir pour entraîner un groupe turboalternateur. C'est le rôle du fluide de refroidissement, qu'on choisira encore le moins absorbant possible.

Pour ces raisons, lorsqu'on emploie comme matière fissile de l'uranium naturel, on est contraint d'utiliser comme modérateur du graphite ou de l'eau lourde et comme fluide de refroidissement du gaz carbonique sous pression ou de l'eau lourde.

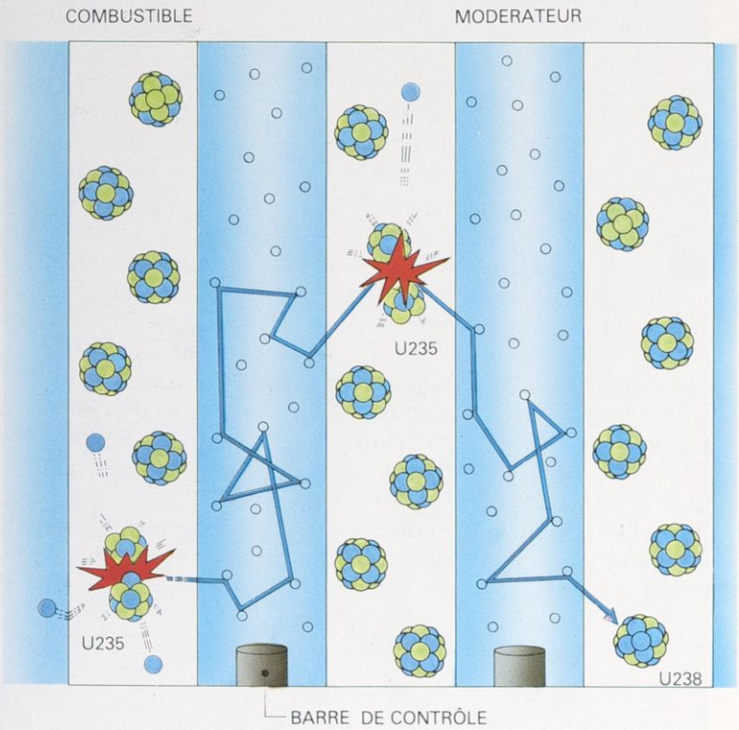
Le rôle du modérateur

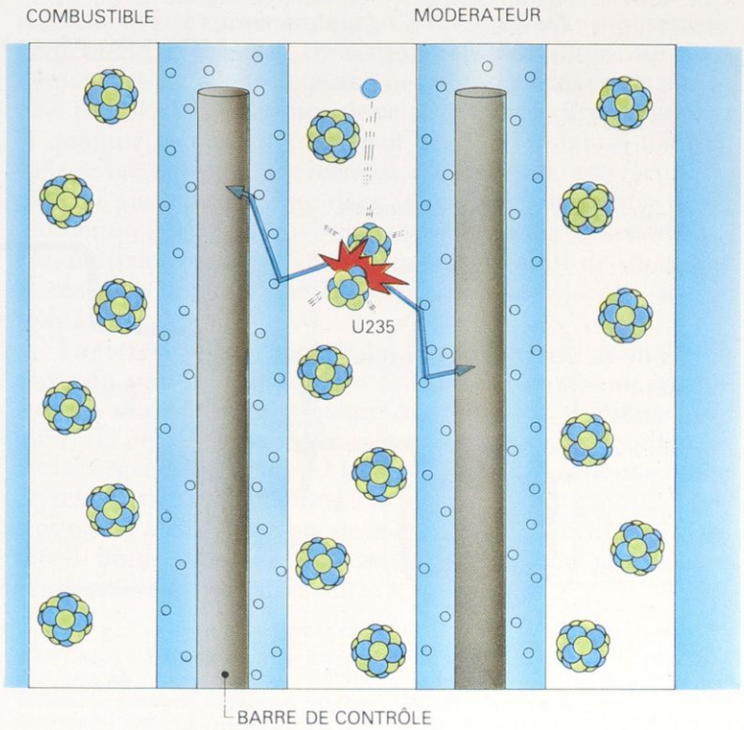
Lors de la fission des noyaux d'uranium, les neutrons produits sont expulsés avec une grande énergie (1,6 MeV en moyenne) à une vitesse de 20 000 kilomètres à la seconde. Pour obtenir l'entretien d'une réaction en chaîne sans devoir recourir à des combustibles trop enrichis en matière fissile, il est nécessaire de ralentir ces neutrons en leur faisant perdre leur énergie par des chocs successifs sur les noyaux d'un milieu ralentisseur appelé modérateur. Ce milieu modère la vitesse des neutrons et leur permet ainsi d'échapper aux captures dans les « trappes » de l'uranium 238. Celui-ci a en effet la propriété d'absorber facilement tous les neutrons qui viennent frapper ses noyaux avec une énergie bien définie correspondant à d'étroites plages de résonance, c'est-à-dire à des valeurs déterminées de vitesse. Si l'on réussit à ralentir les neutrons jusqu'à une vitesse de quelques kilomètres par seconde, ils seront disponibles pour briser les noyaux d'uranium 235.

Les neutrons se comportent comme un gaz très dilué (à une pression équivalant à moins de un dix milliardième d'atmosphère) formé de particules sans charge électrique. L'absence de charge leur permet de circuler entre les atomes de la matière sans subir d'actions électriques, sans modifier leur trajectoire autrement que par chocs sur les noyaux rencontrés. Ces chocs leur font perdre progressivement leur énergie, d'autant plus vite que la masse du noyau rencontré est plus voisine de la leur. Le meilleur milieu modérateur est à cet égard l'hydrogène, de l'eau par exemple. L'hydrogène a cependant un inconvénient : son noyau est capable d'absorber le neutron qui vient le frapper. Pas à coup sûr, mais avec une probabilité suffisante pour qu'on ne puisse l'employer dans un réacteur à uranium naturel. Le deutérium sera utilisé sous la forme d'eau lourde et le carbone sous celle de barres de graphite, disposées autour des éléments combustibles. Les neutrons prennent naissance dans ces éléments, circulent dans tout le milieu, perdent leur énergie lorsqu'ils rencontrent les noyaux du modérateur, et leur course en zigzag finit par les ramener dans le combustible à l'énergie adéquate pour casser les noyaux d'uranium 235 et entretenir la réaction en chaîne.



1.15

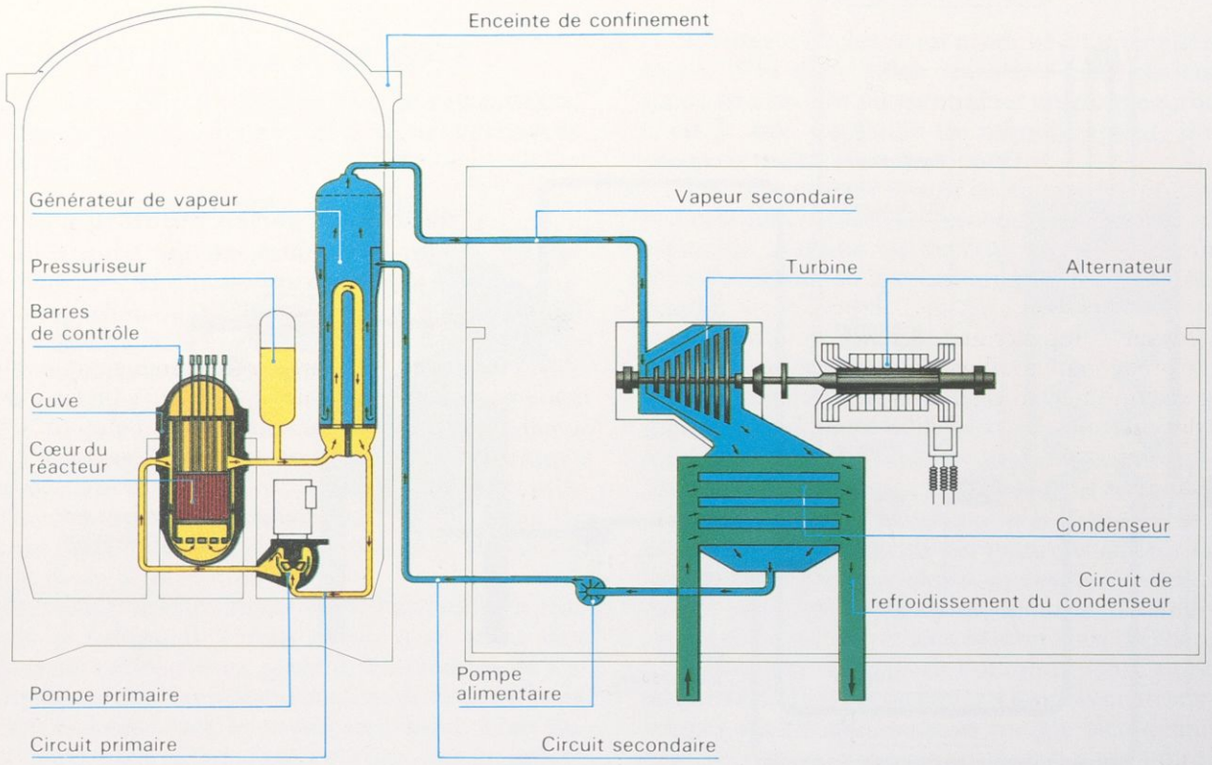




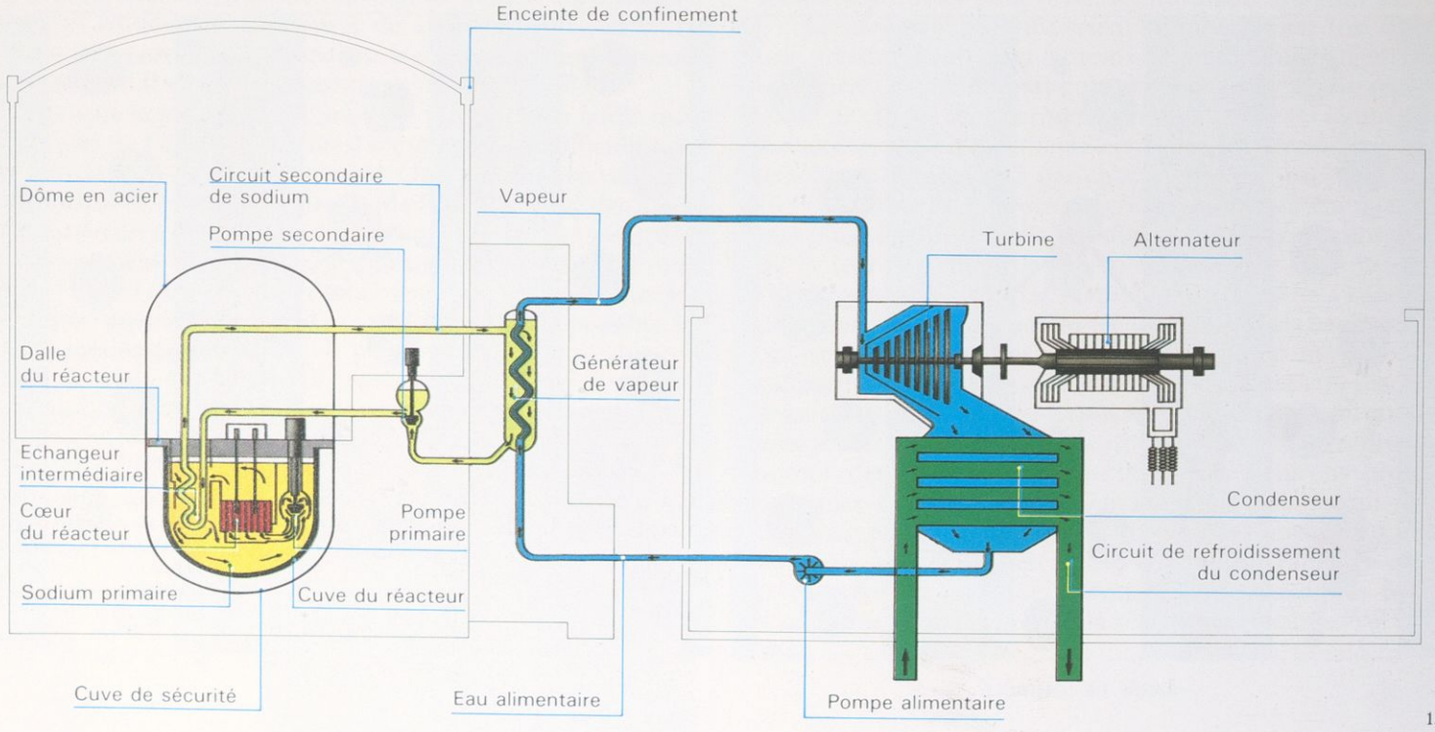
1.16

1.15 ***Réacteur à uranium naturel - schéma de principe :*** *dans un tel réacteur, de l'uranium naturel est placé dans un empilement de barres de graphite qui ralentit les neutrons. Un courant de gaz carbonique soufflé sur les cartouches d'uranium transporte la chaleur produite par les fissions à un échangeur où de l'eau bout à l'intérieur de tubes d'acier. La vapeur produite entraîne un turboalternateur puis se condense sur des tubes parcourus par l'eau froide d'un circuit extérieur indépendant. Noter la séparation totale des circuits de fluides.*

1.16 ***Le rôle du modérateur :*** *les neutrons émis à grande vitesse dans la fission perdent leur énergie et se ralentissent, par chocs successifs sur les noyaux d'un modérateur (hydrogène, deutérium ou graphite). A faible vitesse, ils cassent facilement les noyaux d'uranium 235 sans se faire absorber par l'uranium 238. Le réglage de la réaction en chaîne, son démarrage ou son arrêt se font en retirant ou en introduisant dans le réacteur un absorbant de neutrons, du bore par exemple. Dans le premier état du réacteur représenté, les barres de contrôle absorbantes sont levées, les neutrons se ralentissent par chocs sur les noyaux du modérateur, l'entretien d'une réaction en chaîne est possible. Dans le second état représenté, les barres introduites absorbent les neutrons produits et la réaction en chaîne s'arrête.*



1.17



1.18

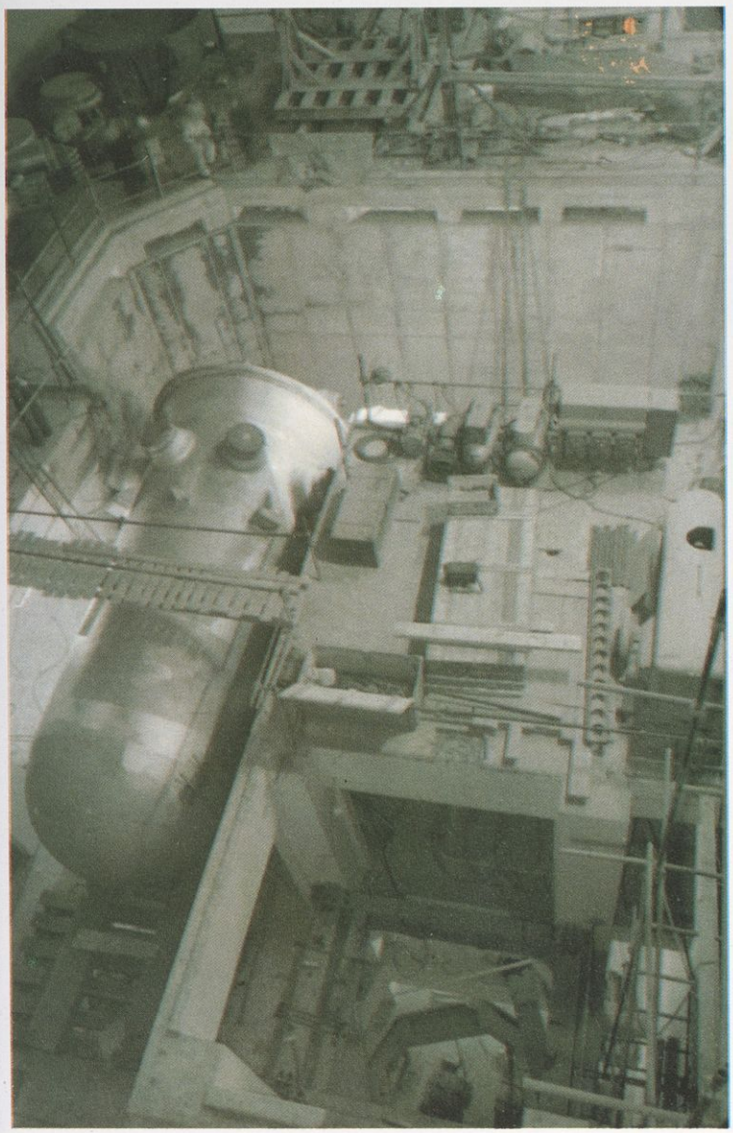
1.17 ***Réacteur à uranium enrichi - schéma de principe :*** *l'enrichissement de l'uranium permet d'utiliser l'eau comme ralentisseur des neutrons et comme fluide d'extraction de la chaleur. Dans le réacteur à eau sous pression représenté, l'eau du circuit primaire fait bouillir l'eau d'un second circuit complètement séparé.*

1.18 ***Réacteur surgénérateur - schéma de principe :*** *la teneur du combustible en plutonium est suffisante pour rendre inutile le modérateur. Pour favoriser les captures de neutrons par l'uranium 238 et le remplacement du plutonium consommé, on extrait la chaleur du cœur par un premier circuit de sodium, rendu radioactif par son passage dans le flux de neutrons. Pour éviter toute réaction de ce sodium radioactif avec de l'eau, un second circuit de sodium (ici coloré en vert) transporte la chaleur depuis le réacteur jusqu'aux générateurs de vapeur. Les autres éléments se transposent des schémas précédents.*

Les réacteurs à uranium enrichi

Lorsqu'on dispose d'uranium enrichi à 3 % en uranium 235, on peut utiliser comme fluide de refroidissement de l'eau dont l'hydrogène sert de modérateur. L'absorption de neutrons par l'hydrogène, qui empêchait son usage avec un combustible à 0,7 % en uranium 235, est cette fois acceptable. Dans la filière retenue par la France pour son équipement, l'eau est maintenue sous une forte pression qui l'empêche de bouillir dans le réacteur. Cette eau extrait la chaleur du cœur du réacteur et va la céder dans un générateur de vapeur à l'eau d'un second circuit complètement distinct du premier et maintenu à une pression plus faible. Cette eau se vaporise et la vapeur formée va entraîner un groupe turboalternateur. C'est la conception des centrales dites de la filière à uranium enrichi et à eau sous pression.

Il existe d'autres types de centrales à uranium faiblement enrichi. Elles utilisent comme ralentisseur des neutrons soit l'eau ordinaire, soit l'eau lourde, soit le graphite, soit un liquide organique. Le choix du fluide de refroidissement se fait entre l'eau bouillante, l'eau lourde, l'hélium, le gaz carbonique ou encore un liquide organique.



1.19

Les réacteurs surgénérateurs

Lorsqu'on emploie directement l'uranium naturel (dans les réacteurs à uranium naturel graphite-gaz par exemple) ou après l'avoir enrichi jusqu'à 3 % en uranium 235 (comme dans les réacteurs à eau sous pression), on consomme la plus grande partie de l'uranium 235 et un peu d'uranium 238 converti en plutonium 239. Mais, si l'on rapporte à la masse d'uranium naturel initial la masse de matière utilisée, elle est d'environ 1 %. Le reste constitue un résidu inutilisable sous cette forme, l'uranium appauvri en uranium 235 (teneur de l'ordre de 0,2 % en U 235).

L'intérêt des réacteurs surgénérateurs est de valoriser cette matière première sans valeur. A cet effet, on favorise la conversion d'uranium 238 en plutonium 239. Pour cela, on utilise des combustibles nucléaires riches en matière fissile (de l'ordre de 15 à 25 % dans les réacteurs actuels en plutonium ou uranium 235). On peut ainsi se passer de modérateur.

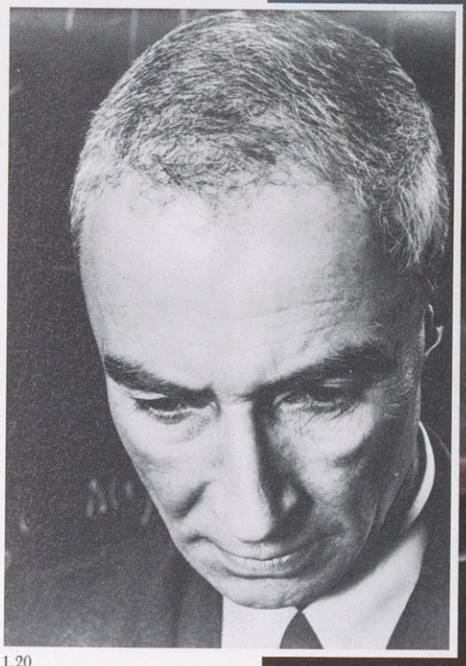
Sur les trois neutrons émis dans la fission d'un noyau de plutonium d'un réacteur surgénérateur, l'un doit servir à entretenir la réaction en chaîne (retrouver un autre noyau de plutonium, le casser, redonner trois neutrons, etc.) ; un autre va être capturé à tout coup par un noyau d'uranium 238 et redonner le noyau de plutonium cassé au départ (le réacteur est régénérateur) ; le dernier va tantôt être perdu (capturé par les matériaux de structure, de protection, etc.), tantôt se faire de nouveau capturer par un noyau d'uranium 238 et donner un peu plus de plutonium qu'il n'y en avait initialement (le réacteur va être surgénérateur). Ce n'est pas un « mouvement perpétuel » ; il y a bien consommation d'uranium 238 mais l'espoir mis dans les réacteurs à neutrons rapides est de multiplier par 50 à 80 l'utilisation de celui-ci, c'est-à-dire finalement la quantité d'énergie qu'on peut tirer de l'uranium naturel. Cela se fait après retraitement du combustible, par récupération du plutonium formé dans le réacteur, utilisation de ce plutonium pour fabriquer une nouvelle charge de combustible, nouveau passage dans le réacteur, et ainsi de suite. Sur le réacteur français Phénix, l'opération a déjà été répétée trois fois.

La forte densité d'énergie, les flux importants de chaleur à sortir du combustible rendent difficile l'extraction de la chaleur au moyen de gaz (malgré des tentatives d'utiliser l'hélium) ; la nécessité de ne pas ralentir les neutrons pour favoriser la surgénération empêche de recourir à l'eau comme fluide de refroidissement (l'hydrogène de cette eau serait un excellent modérateur). Une bonne solution est de faire appel à un métal liquide, le sodium, pour transférer la chaleur du combustible à des générateurs de vapeur.

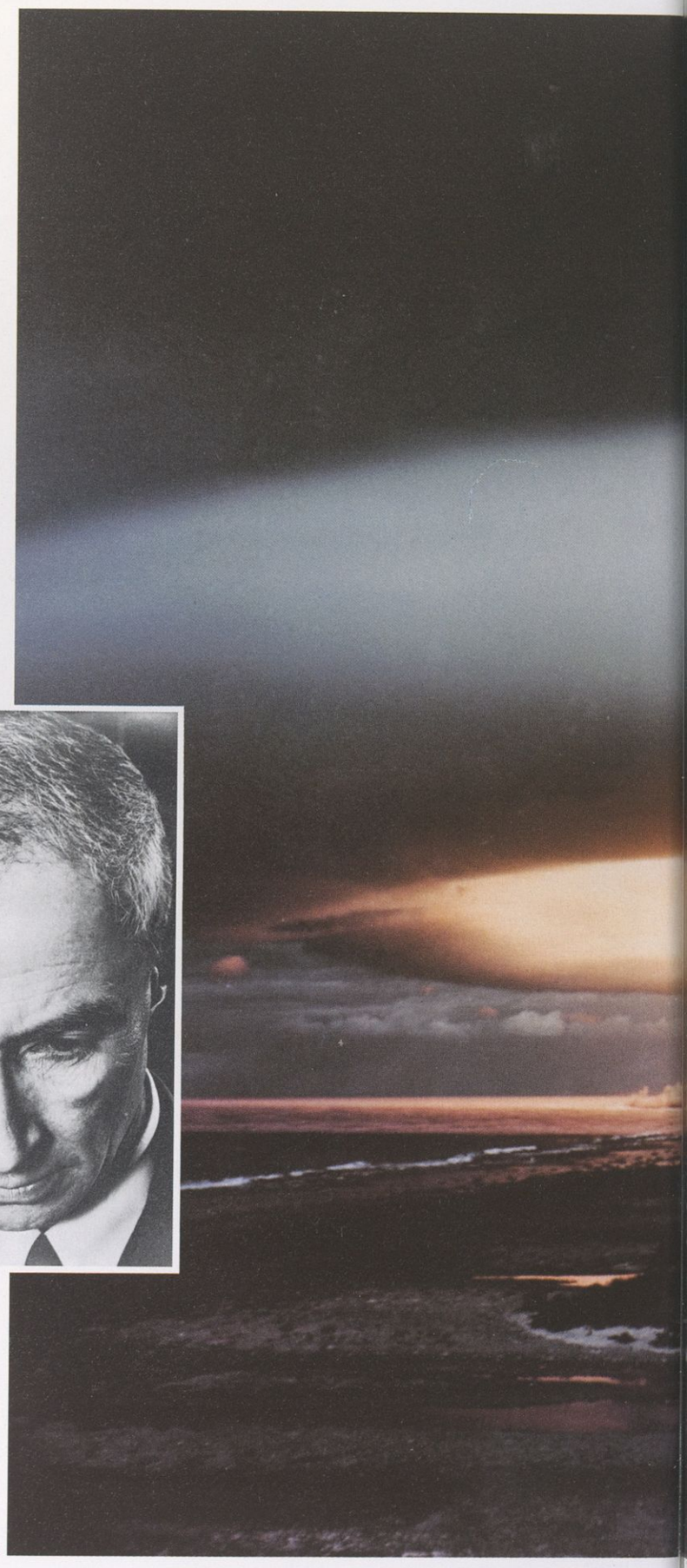
*1.19 **Chooz - Mise en place de la cuve** : le réacteur de Chooz est un des premiers réacteurs à eau sous pression vendus par Westinghouse. Commandé en 1960 par la Société d'Électricité Nucléaire des Ardennes (SENA), ce réacteur a divergé le 19 octobre 1966. Les travaux avaient commencé en 1962.*

Plus clair que mille soleils...

La Seconde Guerre mondiale va donner un tour nouveau aux travaux en physique nucléaire. Joliot-Curie et son équipe sont les plus avancés en 1939. Conscients des dangers que le monde courrait si Hitler développait les applications militaires de l'énergie nucléaire, ils font acheter en Norvège tout le stock d'eau lourde disponible et, après diverses péripéties, le mettent à l'abri en Angleterre. L'avance des troupes allemandes en 1940 disperse l'équipe ; pour un temps, la recherche piétine aussi bien en Europe qu'aux États-Unis. C'est toujours la crainte de voir Hitler contrôler le monde grâce à une arme nouvelle qui pousse Einstein, Szilard et plusieurs savants émigrés à intervenir auprès du président Roosevelt pour que les États-Unis soient les premiers à disposer d'une bombe atomique. De là naîtra le projet «Tube Alloy», bientôt appelé «Manhattan». Ce projet va mobiliser pendant plusieurs années tout ce que l'Amérique compte de physiciens nucléaires, de chimistes, de techniciens de talent. Toutes les voies pour obtenir une réaction en chaîne explosive vont être explorées, étudiées, approfondies pour les unes, abandonnées pour les autres. Tout le développement futur de l'énergie nucléaire est en germe dans les travaux qui aboutissent le 16 juillet 1945 à l'explosion de la première bombe atomique dans le désert du Nouveau-Mexique, puis au mois d'août à la destruction d'Hiroshima et de Nagasaki.



1.20

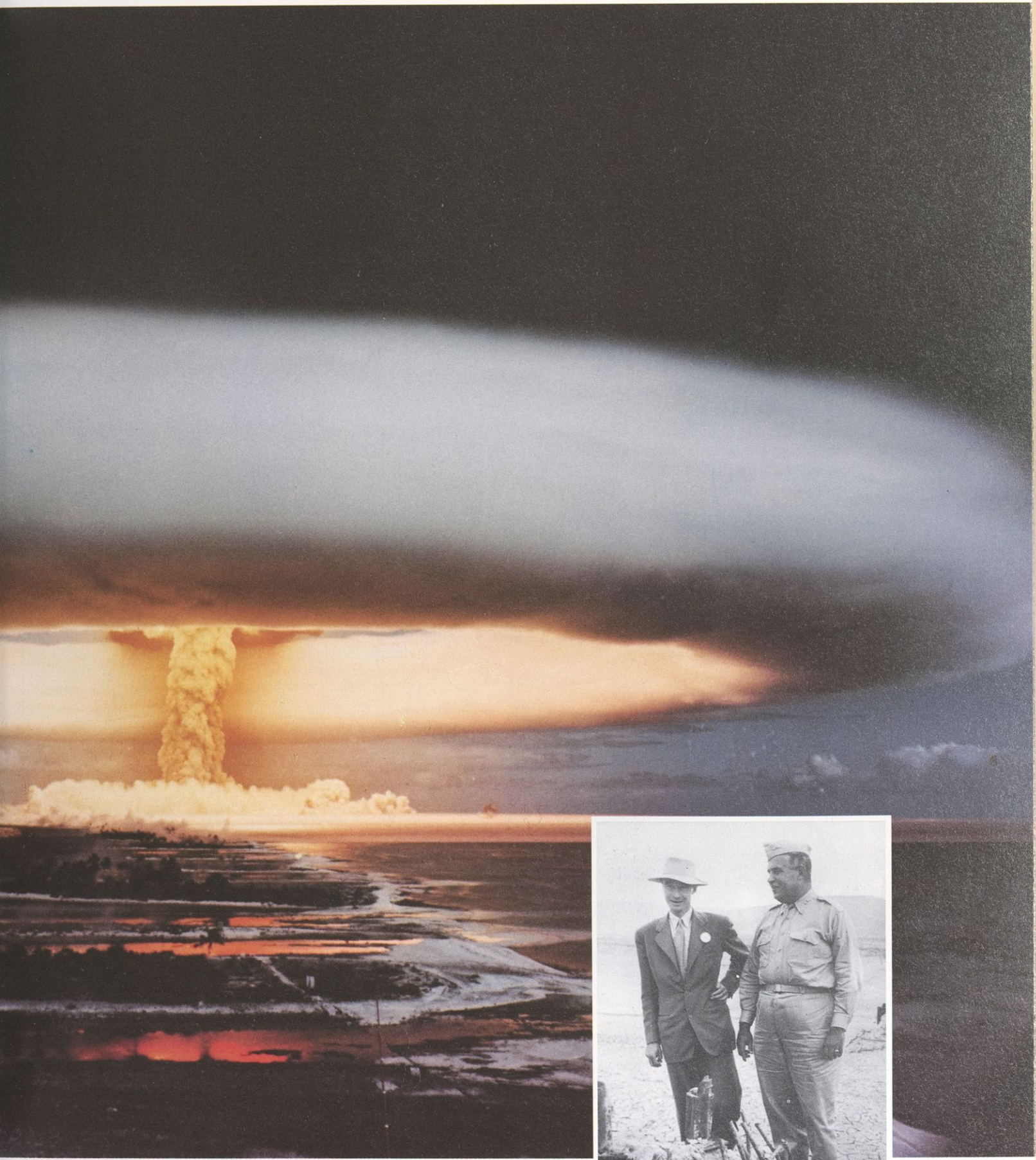


1.21

1.20 ***Robert Oppenheimer*** *(1905-1967): esprit universel, sensible et fin, Oppenheimer dirigea à Los Alamos l'équipe de savants et de techniciens qui construisit la première bombe atomique. La fin de sa vie fut une suite d'épreuves morales. Il fut accusé de trahison par la Commission Mac Carthy puis lavé de tout soupçon; les scrupules d'une conscience exigeante le tourmentèrent jusqu'à sa mort, lui reprochant la terrible responsabilité morale qu'il avait prise: celle d'avoir mis volontairement la science au service de la guerre, fût-ce pour mettre fin au plus meurtrier des conflits.*

1.21 ***Plus clair que mille soleils:*** *lorsque Oppenheimer vit la lumière de la première explosion atomique dans le Nouveau-Mexique, les témoins rapportent qu'il cita de mémoire les Upanishads, les textes sacrés de l'Inde: « Il semble qu'un millier de soleils se soient levés ensemble dans le ciel» (Baghavad Gita XI, 11) et aussi: « Je suis la Mort qui tout saisit. » (Id. X, 34).*

1.22 ***Oppenheimer et le général Groves:*** *le directeur scientifique de Los Alamos et l'organisateur de la victoire industrielle devant les restes de la plate-forme de l'essai Trinity dans le désert du Nouveau-Mexique où en prélude à l'essai nucléaire on fit exploser 2 000 tonnes de TNT.*

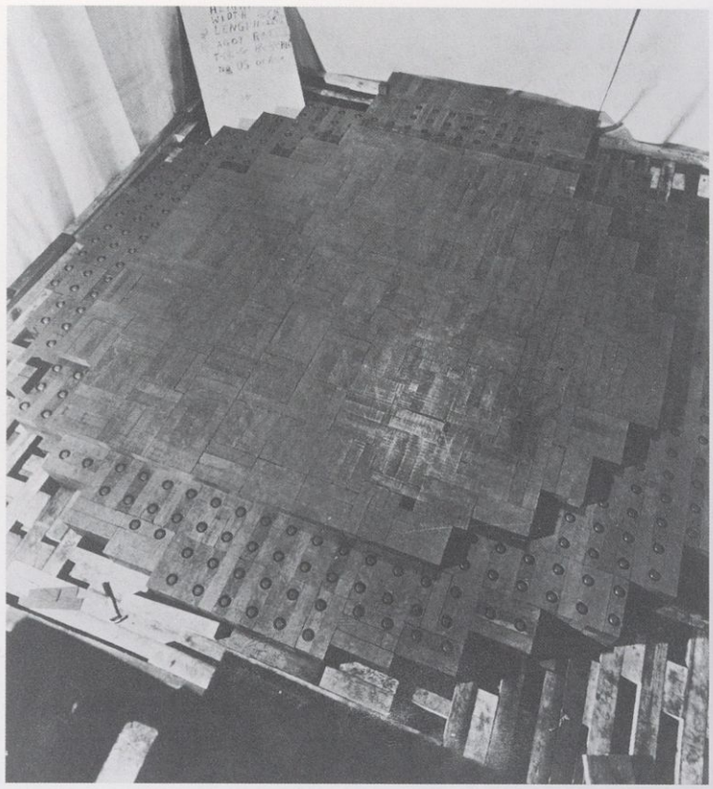


1.22

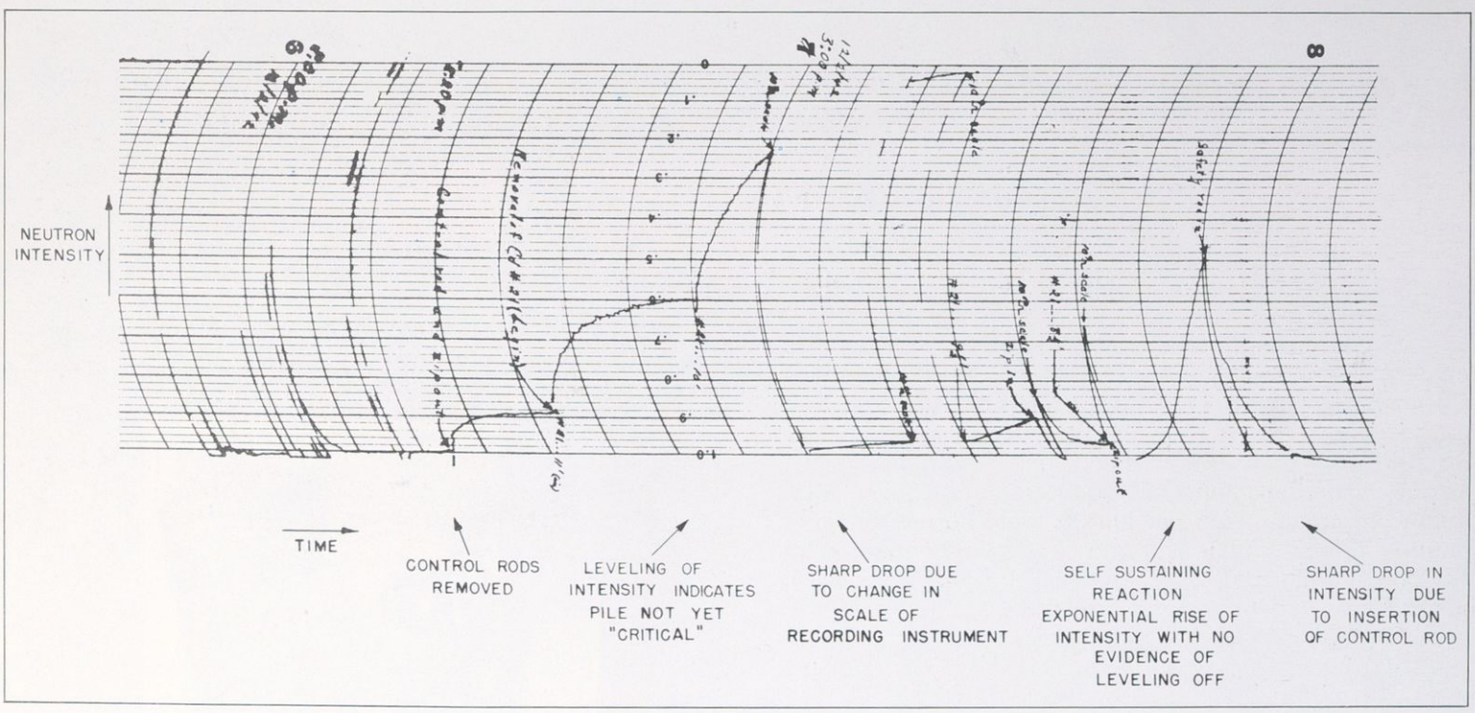
Fermi et le réacteur du stade de Chicago

Une des premières choses à faire était de démontrer la possibilité réelle d'entretenir une réaction en chaîne. Ce fut le rôle de Fermi, qui choisit de construire un réacteur à uranium naturel modéré par du graphite et fonctionnant dans l'air à une puissance assez faible pour ne poser aucun problème de refroidissement. Ce réacteur fut installé sous les gradins du stade de Stagg Field à l'université de Chicago. Il divergea pour la première fois le 2 décembre 1942. Il fut suivi, sur-le-champ, de la construction à Hanford, dans l'État de Washington, de trois réacteurs de grande taille, conçus sur le même principe. Ces réacteurs étaient destinés à produire du plutonium, dont on avait montré qu'il se formait dans ce type de réacteur et qu'il pouvait donner une réaction en chaîne comme l'uranium 235. Une gigantesque usine chimique avec de nombreux équipements téléguidés traitait le combustible irradié. De cette usine sortira le plutonium de deux des premières bombes, celle qui explosera à Alamogordo, dans le désert du Nouveau-Mexique, et Fat Man, celle de Nagasaki.

L'équipement de Hanford se poursuivra et huit réacteurs y seront construits. Un peu plus tard, cinq réacteurs, à eau lourde cette fois, leur seront adjoints à Savannah, en Georgie. Ils produiront le plutonium et le tritium nécessaires aux besoins militaires des États-Unis.



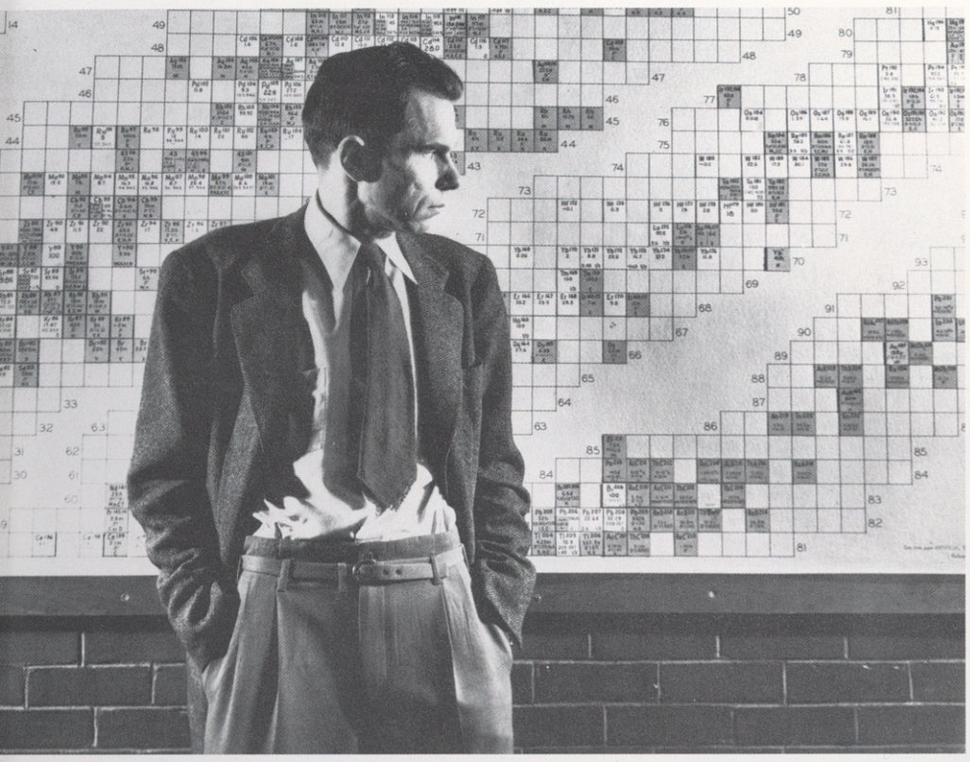
1.23



1.24

1.23 ***Le réacteur de Stagg Field:*** *le 2 décembre 1942, dans le stade de l'université de Chicago, la construction du premier réacteur nucléaire atteint le 51e lit de l'empilement de briques de graphite, de lamelles d'uranium et de capsules d'oxyde d'uranium. Fermi fit retirer du réacteur des barres absorbantes en cadmium et comme il l'avait prévu par le calcul, déclencha la première réaction en chaîne provoquée par l'homme sur la terre. La photographie a été prise au niveau du 18e lit de graphite. L'empilement de 7 mètres de côté comportait 400 tonnes de graphite, 6 tonnes d'uranium métallique et 51 tonnes d'oxyde d'uranium dont on voit ici les capsules sphériques.*

1.24 ***L'enregistrement historique de la première réaction en chaîne:*** *après trois retraits successifs d'une barre de contrôle en cadmium, le niveau de la population neutronique croît puis se stabilise. La chute apparente de niveau correspond à un changement d'échelle de l'appareil. Après de nouveaux retraits d'absorbants, suivis de changements d'échelle, une montée exponentielle de l'intensité neutronique montre que la réaction en chaîne est amorcée et que le réacteur diverge. L'introduction d'une barre de contrôle stoppe alors le phénomène.*



1.25



1.26

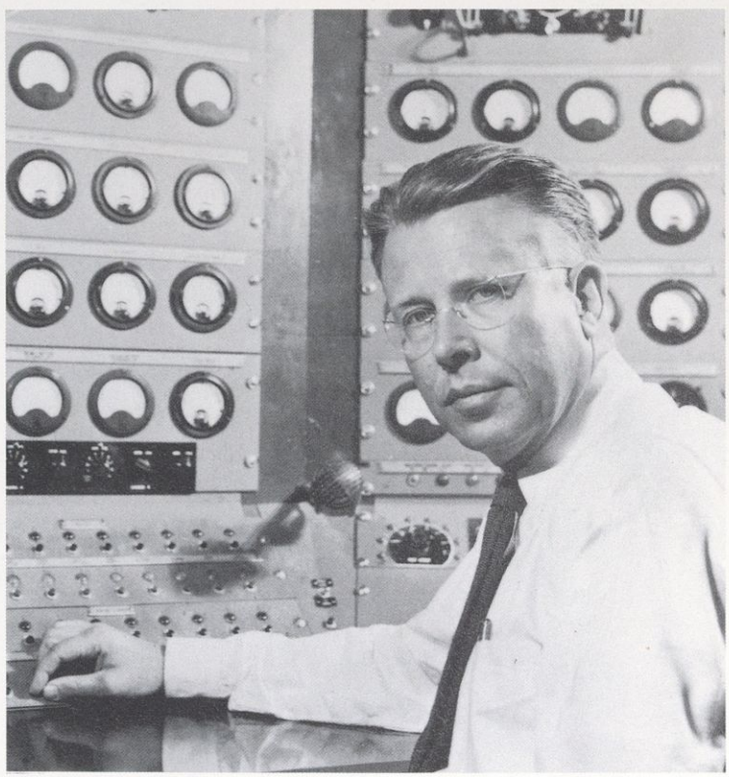
1.25 ***Glenn T. Seaborg :*** *né en 1912, ce savant chimiste découvrit en 1941 le plutonium dont il isola en 1943 les premiers milligrammes.*
Prix Nobel de Chimie en 1951.

1.26 ***Les opératrices d'Oak Ridge :*** *la conduite des calutrons inventés par Lawrence nécessitait le maintien fastidieux de deux aiguilles indicatrices dans un étroit invervalle. Une grande partie de la main-d'œuvre féminine disponible dans le Tennessee en guerre trouva à s'employer devant les milliers de cadrans d'Oak Ridge.*

Oak Ridge et la séparation isotopique

Une autre voie vers la bombe était suivie en parallèle. Il s'agissait de séparer les deux isotopes de l'uranium naturel, les deux variétés qui le composent, et de concentrer l'uranium 235. Tous les procédés imaginables furent testés et utilisés : spectrographe de masse, diffusion thermique, centrifugation, filtration par diffusion au travers de barrières poreuses... Le temps manquait. Il fallut, sans attendre la mise au point des méthodes les plus prometteuses, utiliser celle du calutron : dans cet appareil, des batteries d'électroaimants soumettaient à leur action un courant d'ions d'uranium et déviaient différemment les deux isotopes. Cela ne s'était jamais fait que sur des microgrammes de matière au laboratoire de Lawrence à Berkeley, en Californie. Cela se fit en grand à Oak Ridge, dans le Tennessee, où l'énergie électrique était abondante et bon marché. Faute de cuivre, on utilisa l'argent de la réserve monétaire fédérale pour fabriquer les bobines des électroaimants. Chaque batterie d'appareils produisait quelques milligrammes d'uranium 235 par jour et toute l'usine quelques grammes. En juillet 1945, la production accumulée permettait de fabriquer une bombe à l'uranium 235 — et une seule — celle qui explosera sur Hiroshima le 6 août 1945.

Les efforts gigantesques consentis par la nation américaine aboutiront grâce à la coordination du général Groves et aux travaux du physicien Oppenheimer. Avec Hiroshima et Nagasaki, ils termineront en quelques jours la guerre sauvage et meurtrière du Pacifique. Ce point de départ tragique de l'énergie nucléaire frappa l'imagination collective et, quarante ans plus tard, reste présent dans l'esprit de tous. Oppenheimer, esprit supérieur, fin et sensible, en sera tourmenté jusqu'à sa mort. Si terrifiante que soit la menace suspendue sur nos têtes, nous lui devons pourtant jusqu'à ce jour l'absence de conflit généralisé dans un monde toujours déchiré.



1.27

1.27 ***Le professeur Lawrence dans son laboratoire :*** *comment imaginer Berkeley sans Lawrence (1901-1958) et son laboratoire ? Physicien, ingénieur, constructeur, Prix Nobel de Physique en 1939, il conçut le premier cyclotron en 1930 puis construisit des machines de plus en plus puissantes et mit au point le premier procédé de séparation isotopique par spectrographie de masse. Utilisé pendant la guerre, abandonné ensuite après mise au point de la méthode de séparation par diffusion gazeuse, ce procédé retrouve une nouvelle jeunesse associé à un laser d'excitation.*

La première électricité nucléaire : de Clémentine à EBR 1

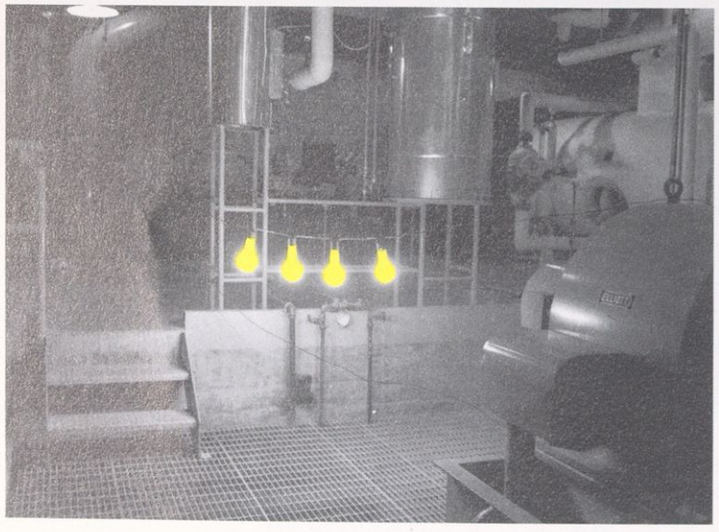
Aux États-Unis, l'effort énorme consenti pendant la guerre se poursuivit d'abord dans le domaine militaire et dans celui de la recherche à long terme.

Par l'Atomic Energy Act de 1946, le Congrès voulut à la fois continuer le développement militaire de l'énergie nucléaire et mettre en place une ossature juridique qui permette les applications industrielles. Cet Act créait l'AEC (Atomic Energy Commission) et chargeait cet organisme du contrôle des activités nucléaires. Il décidait que seul le gouvernement fédéral pouvait posséder des matières fissiles et les usines pour les produire et cantonnait le secteur civil à la recherche et aux activités sans interférence avec le monopole fédéral et les intérêts de la Défense nationale.

C'est dans ce contexte et sous l'impulsion de contrats passés par l'AEC que l'industrie américaine s'est lancée dans la construction des sous-marins nucléaires et dans la prospection minière.

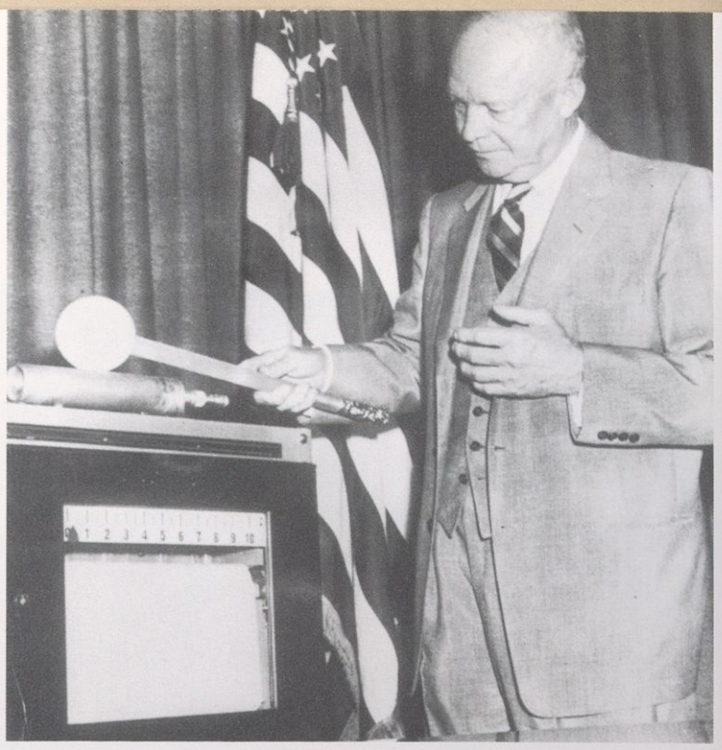
Une filière faisait l'objet d'une attention particulière, celle des réacteurs à neutrons rapides. On voulait, à long terme, être capable d'utiliser complètement l'uranium naturel et pour cela convertir en plutonium l'uranium 238. La première expérience critique à neutrons rapides fut la pile Clémentine de Los Alamos, en 1946, et l'AEC construisit sur le polygone d'essais d'Arco le réacteur à neutrons rapides EBR 1, d'une puissance électrique de 100 kW, qui, le premier au monde, produisit de l'électricité en 1951.

Il faudra attendre 1954 pour que les entreprises civiles interviennent directement, après que le président Eisenhower eut fait adopter par le Congrès des amendements restreignant le domaine réservé à l'AEC aux armes nucléaires et supprimant le monopole fédéral sur les usines de production de matières fissiles, maintenues toutefois sous le contrôle de l'AEC.



1.29

1.29 «Et conflabunt gladios suos in vomeres» (Isaïe, 2-4). Et ils transformeront leurs épées en charrues. Quatre modestes ampoules brillent dans une salle des machines vieillotte. Pour la première fois, on produit de l'électricité à partir des noyaux d'uranium, en 1951, sur la station d'essais d'Arco dans l'Idaho.



1.28

*1.28 **Atoms for peace** : dans un geste symbolique, le Président Eisenhower donne le premier coup de pioche de la construction de la centrale nucléaire de Shippingport. Passant une source de neutrons devant un compteur, il envoie depuis Denver, au Colorado, un signal qui, à plus de 2 000 kilomètres de distance, met en mouvement un bulldozer pour creuser les fondations et marque avec solennité le point de départ de l'industrie nucléaire pacifique.*

Atoms for peace

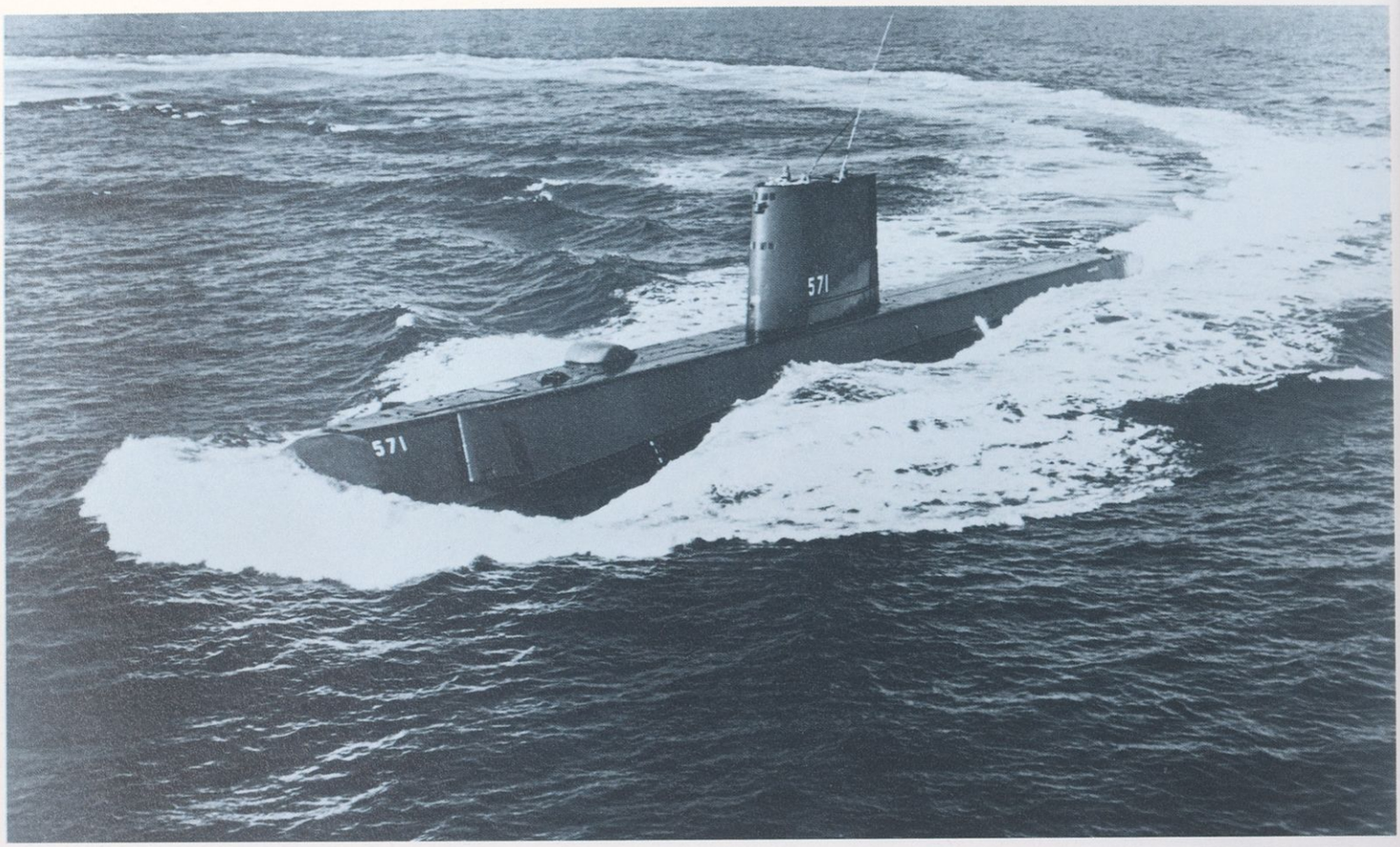
«They shall beat their swords into plowshares», ce verset d'Isaïe imprégnait profondément les responsables américains quelques années après la guerre, et leur désir de bâtir dans la paix la Jérusalem future était tout aussi sincère que celui des Soviétiques ou des responsables des autres pays. Cet angélisme rejoignait la Realpolitik d'où naîtra une douzaine d'années plus tard le traité de non-prolifération nucléaire : il apparaissait à l'évidence qu'on ne pouvait maintenir indéfiniment secrètes les découvertes scientifiques fondamentales faites pour la mise au point des bombes et que le monde libéral ne pouvait tenir sous le boisseau les promesses d'une source d'énergie nouvelle. Et cela, d'autant plus que le monopole du premier des grands à disposer de l'arme nucléaire était battu en brèche par son principal rival et remis en question par des alliés plus ou moins dociles dans leurs intentions.

Générosité et calcul mêlés, enthousiasme généreux, utopie des visionnaires, tout concordait pour faire de la conférence de Genève «Atoms for peace» l'aube d'une ère nouvelle. Un succès de relations publiques aussi, pour les États-Unis promoteurs, pour l'Union soviétique seule à disposer d'une centrale civile de production d'électricité, pour la France et pour l'Angleterre dont les savants et les techniciens présentaient des résultats et des projets impressionnants, pour le reste du monde enfin, émerveillé de participer. La voie était libre vers les applications pacifiques de l'empire nucléaire.

Il reviendra à la décennie suivante de tirer la leçon d'une exégèse plus complète de l'Ancien Testament. Le prophète Joël nous le rappelle, les charrues peuvent elles aussi se reforger comme le feront les peuples de la vallée de Josaphat : «Concidite aratra vestra in gladios» (Joël, 3-10). De réacteurs au départ destinés à des fins civiles, on peut tirer les éléments nécessaires aux armes nucléaires. Les bonnes intentions sont insuffisantes. Il faut un contrôle efficace pour éviter les détournements à des fins militaires.



1.30 **Sonia Delaunay : Prismes électriques,** *huile sur toile, 1914. Deux ans après l'article « Uber das Licht » publié par Robert dans Der Sturm, « Sonia fixe sur la toile, le halo de lumière qui auréole les nouveaux éclairages publics, laissant apparaître toutes les couleurs du prisme ». Une des toiles les plus importantes de l'orphisme.*



1.31

Arco - le sous-marin du désert, le *Nautilus*

On a peine à imaginer aujourd'hui les difficultés que dut surmonter l'amiral Rickover (capitaine de vaisseau à l'époque) pour convaincre l'état-major de la marine américaine de l'intérêt des sous-marins nucléaires. La propulsion nucléaire donne à un navire un rayon d'action illimité. Une première étude du Laboratoire National d'Argonne, près de Chicago, montra qu'il était possible de réaliser un réacteur compact, donc logeable dans un sous-marin, en utilisant de l'uranium enrichi refroidi par de l'eau sous pression. Et en 1949, démarra la construction d'un prototype S 1 W (S, comme Submarine ; 1, numéro d'ordre ; W, comme Westinghouse, constructeur). Installé à la station d'essais de la marine (NRTS, Navy Reactor Test Station) d'Arco, dans l'État de l'Idaho, en plein désert, il divergea le 30 mars 1953. C'est le prototype de tous les réacteurs à eau sous pression.

Les résultats de l'expérience avaient été suffisamment prometteurs pour mettre sur cale dès juin 1952 un sous-marin nucléaire. Premier d'une longue série, le *Nautilus* fut lancé à Groton (Connecticut) en janvier 1954 et mis en service en 1955. Sa croisière sous la calotte glaciaire de l'Arctique et son passage au pôle Nord le 3 août 1958, redoublé peu après par le *Skate,* autre sous-marin nucléaire, ont montré la fiabilité de cette technique et ses performances. A leur tour, l'Union soviétique, la Grande-Bretagne, la France et récemment la Chine allaient développer la technologie des sous-marins nucléaires à eau sous pression. Un autre modèle refroidi au sodium fut essayé aux États-Unis à partir de 1952 (SIR, Submarine Intermediate Reactor). Il équipa le sous-marin *Seawolf,* qui parcourut 70 000 milles marins de 1957 à 1959 mais fut abandonné après des fuites de sodium aux surchauffeurs de vapeur.



1.32

1.31 Le « Nautilus » prend la mer : *lancé le 21 janvier 1954, le USSN 571 porte le nom du sous-marin de Jules Verne. Déplaçant plus de 3 000 tonnes, long de 98 mètres, il a navigué 30 ans avant d'être retiré du service en 1985.*

1.32 L'amiral Hyman G. Rickover, *père de la Marine nucléaire américaine, visite le « Nautilus ». Après les réacteurs de sous-marins, son équipe concevra et fera réaliser le réacteur civil de Shippingport.*

Shippingport et Dresden

Aux États-Unis, le démarrage des applications civiles se fit sous l'impulsion de l'AEC (Atomic Energy Commission), organisme fédéral. En 1953, le Joint Committee on Atomic Energy du Congrès des États-Unis estimait que la mise au point industrielle des réacteurs à eau sous pression et des réacteurs modérés au graphite et refroidis au sodium était possible dans un délai de trois ans, celle des réacteurs à eau bouillante devant demander cinq ans. Les réacteurs homogènes à sels d'uranium fondus ou dissous, comme les réacteurs surgénérateurs, semblaient promis à un grand avenir, mais à échéance plus lointaine.

En 1954, le Congrès des États-Unis approuva un programme de cinq expériences industrielles. L'AEC lança donc simultanément un réacteur à eau sous pression de 60 MW à Shippingport, près de Pittsburgh, en Pennsylvanie, et toute une série de réacteurs prototypes. L'exploitation de Shippingport construit par Westinghouse fut confiée à une compagnie privée d'électricité de la région, la Duquesne Light Company. On voulait démontrer la faisabilité d'un réacteur de grandes dimensions sans chercher la rentabilité.

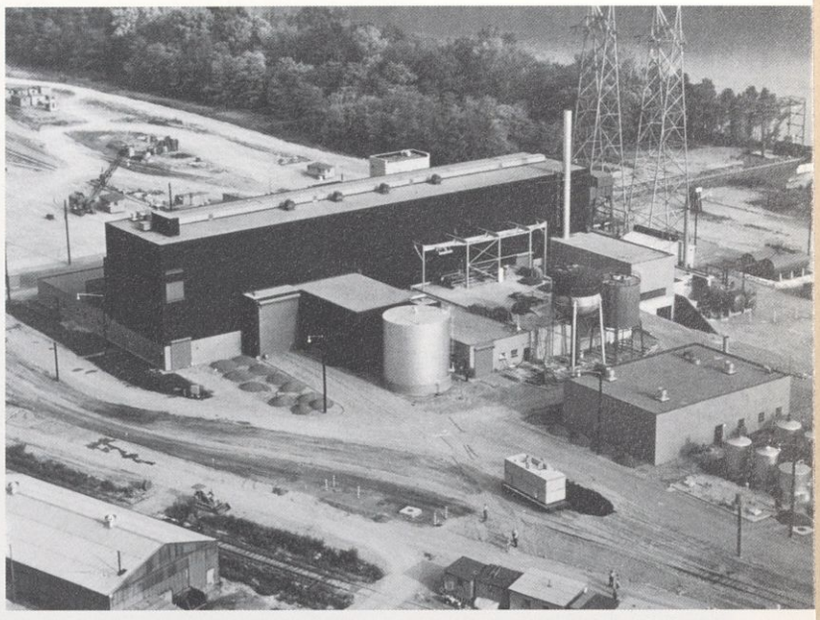
Les prototypes exploraient toutes les voies retenues par le Comité: EBWR (Experimental Boiling Water Reactor) au Laboratoire National d'Argonne pour l'eau bouillante, SRE (Sodium Reactor Experiment) à Santa Susanna en Californie pour la modération au graphite associée au refroidissement par le sodium, HRE 2 (Homogeneous Reactor Experiment) à Oak Ridge pour les réacteurs homogènes modérés à l'eau lourde, enfin le réacteur surgénérateur EBR 2 (Experimental Breeder Reactor), 18,5 MW, qui fonctionne depuis 1960 à la station d'essais d'Idaho Falls.

Les sociétés privées purent intervenir à partir de 1954, aidées par l'AEC, qui prenait en charge les recherches et les frais d'utilisation du combustible pendant les sept premières années.

Westinghouse construisit Yankee Rowe, réacteur à eau sous pression de 185 MW, en service depuis 1961 ; Babcock et Wilcox, dans la même filière, voulut à Indian Point (265 MW), près de New York, mieux utiliser l'uranium en jouant sur l'arrangement du cœur du réacteur et convertir en matière fissile un matériau abondant et inutilisé, le thorium. General Electric, de son côté, appuyé sur l'expérience de son propre réacteur d'essais de Vallecitos, en Californie, vendit à Commonwealth Edison, sans aide de l'AEC, le réacteur à eau bouillante de Dresden (200 MW) en service de 1960 à 1984, puis à Pacific Gas and Electricity Company le petit réacteur d'Humboldt Bay, en Californie.

Un temps, l'AEC encouragea Atomics International, filiale de North American Aviation, à donner une suite à SRE. Ce fut le réacteur de 75 MW de Hallam au Nebraska, lui aussi modéré au graphite et refroidi par du sodium, qui fonctionna de 1962 à 1964.

Enfin, une association de producteurs américains et japonais porta tous ses efforts sur un surgénérateur de 61 MW, Enrico Fermi, construit près de Detroit. Critique en 1963, ce réacteur fut victime d'un incident de bouchage de canal en 1966. Réparé et redémarré en 1970, il fut arrêté en 1971 après épuisement du combustible, victime du succès économique des autres filières.



1.33



1.34

1.33 ***Shippingport*** *: premier réacteur civil industriel commandé par l'AEC à Westinghouse en 1953. Entré en service en 1957, ce réacteur à eau sous pression de 60 MW fonctionna jusqu'en 1974 puis fut réutilisé de 1977 à 1982 comme réacteur d'essais avec un cœur au thorium.*

1.34 ***Dresden*** *(Illinois) : premier réacteur commercial, vendu par General Electric à Commonwealth Edison en 1955. Entré en service en 1960, ce réacteur à eau bouillante de 200 MW fonctionna jusqu'en 1984.*

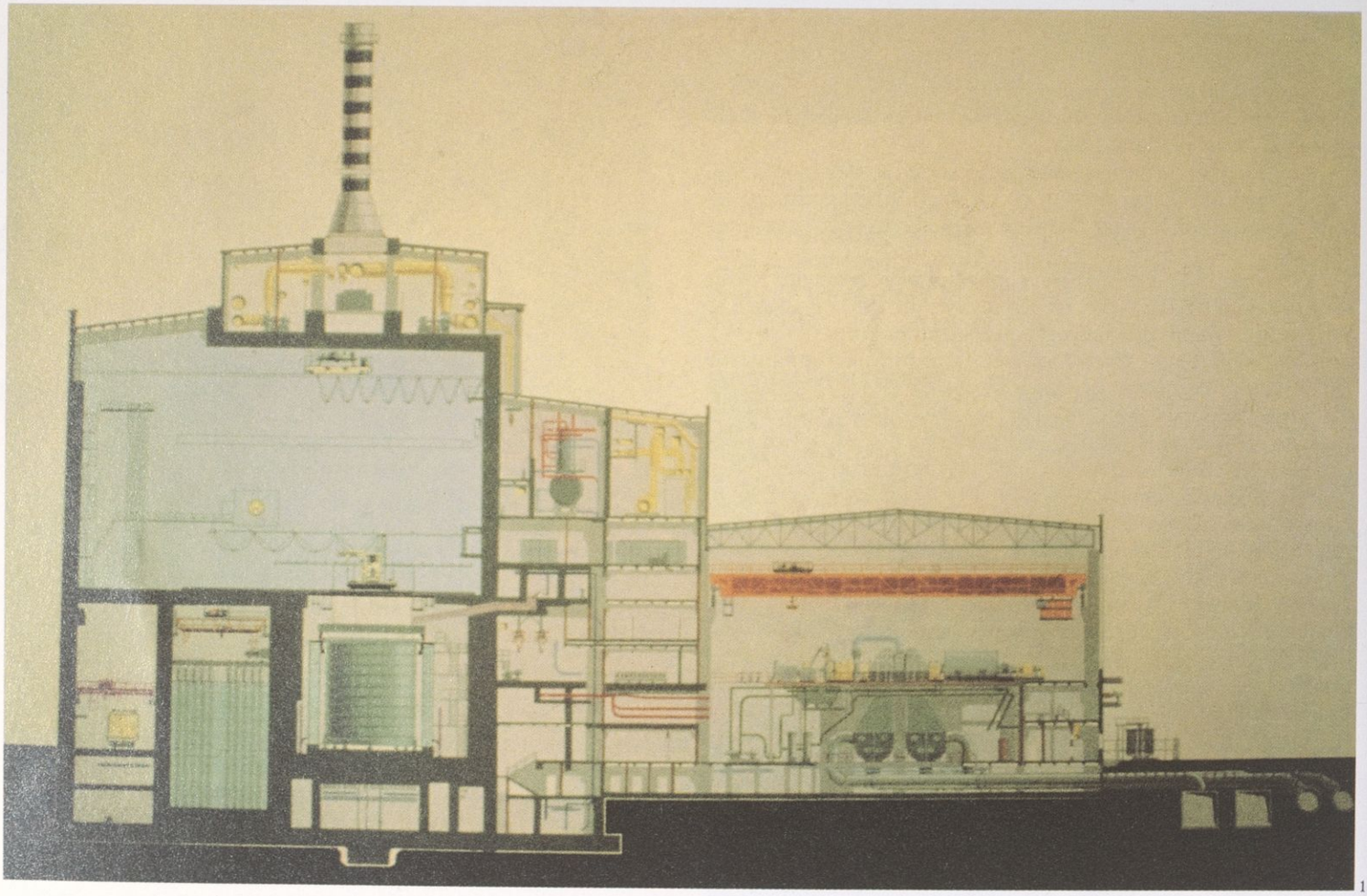
Obninsk et ses successeurs

La science nucléaire soviétique s'est développée dès la fin des années 30 sous l'impulsion des savants comme Kourtchatov et Frenkel. Khariton démontra théoriquement en 1939 la possibilité d'une réaction en chaîne, en même temps que les chercheurs occidentaux. La guerre de 1941-1945 n'interrompit pas les recherches, qui aboutirent le 20 août 1949 à l'explosion de la première bombe atomique soviétique, bien plus tôt que ne l'imaginaient les Américains. Préparé pour satisfaire les besoins militaires, l'uranium enrichi se trouva disponible lorsque, pour des raisons idéologiques autant qu'économiques, on fixa des objectifs civils. La première centrale électrique de puissance significative entra en service à Obninsk, près de Kalouga, en 1954. Elle produisait 5 MW électriques avec un réacteur utilisant de l'uranium enrichi à 5 % comme combustible, du graphite comme modérateur de l'énergie des neutrons et de l'eau comme fluide de refroidissement. Ce réacteur, appelé APS 1, permit aux Russes de se présenter en 1955 à la Conférence internationale de Genève «Atoms for peace» comme les champions de l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire. Il est le précurseur de la filière RBMK sur laquelle jusqu'à l'accident de Tchernobyl reposait une part importante du programme soviétique.



1.35

1.35 ***Kourtchatov*** *: l'académicien Kourtchatov (1902-1960) est une figure légendaire de la science nucléaire soviétique. Créateur de plusieurs instituts de recherche, il est le père de la fusion.*



1.36

32 *1.36* ***Beloyarsk (URSS)*** *: coupe du réacteur prototype de 102 MW de la filière à eau bouillante modérée au graphite. Il est entré en service en 1963 et a fonctionné jusqu'en 1983.*



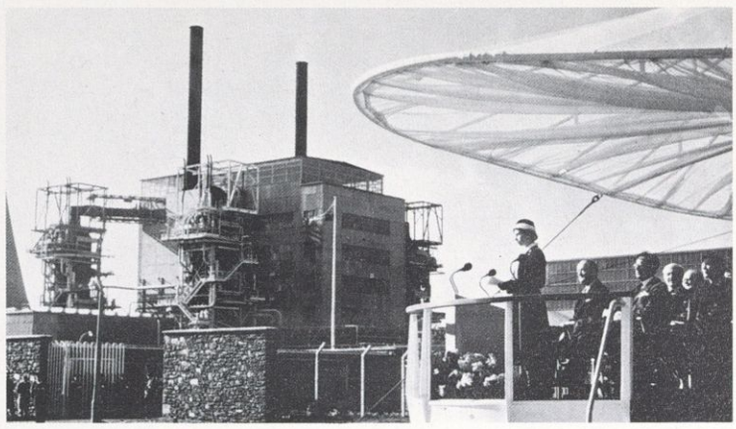
1.37

Calder Hall

A la fin de 1940, après la dispersion de l'équipe française, l'Angleterre se trouvait en pointe de la recherche nucléaire et disposait du stock d'eau lourde acheté par Joliot-Curie. La collaboration avec les États-Unis n'alla pas sans réserves réciproques. Les Anglais travaillèrent avec les Canadiens à la mise au point d'un réacteur à eau lourde à Chalk River, à une centaine de kilomètres d'Ottawa. Le cloisonnement des recherches les empêcha d'avoir accès aux résultats obtenus à Hanford ou à Los Alamos. La loi Mac Mahon en 1946 vint renforcer pendant des années le secret tombé sur les connaissances acquises. L'Angleterre se retrouvait au point de départ, aidée toutefois par les savants qui avaient participé à Manhattan, même s'ils avaient été tenus à l'écart de l'essentiel. Elle était bien décidée pourtant à se doter à son tour de l'arme nucléaire.

Sans négliger la construction d'une usine d'enrichissement isotopique, commencée en 1949, qui entra en service à Capenhurst en 1959, c'est la voie du plutonium qui fut retenue. Après les réacteurs de recherches Gleep et Bepo construits à Harwell en 1947, on passa à l'échelle industrielle à Windscale, dans le Cumberland, où furent édifiés deux réacteurs producteurs de plutonium et une usine de retraitement. Ces réacteurs utilisaient l'uranium naturel, seul combustible disponible, un empilement de graphite comme modérateur et un soufflage d'air comme refroidissement. Ils étaient semblables à un réacteur de recherche construit aux États-Unis à Brookhaven, près de New York. L'air de refroidissement était rejeté à l'atmosphère après filtration. En 1957, un accident entraînant l'incendie d'un des deux réacteurs montra le danger d'installations aussi rudimentaires. Après leur mise en service en 1950 et 1951, l'Angleterre put faire exploser sa première bombe, le 3 octobre 1952, aux îles de Montebello, au large de la côte ouest de l'Australie.

L'expérience acquise permit à partir de 1953 de mettre sur pied un programme de réacteurs destinés à produire de l'électricité et à économiser les ressources en charbon de la Grande-Bretagne. Lancés en série, ces réacteurs, d'une puissance électrique de 50 MW, utilisaient l'uranium naturel comme combustible, le graphite comme modérateur et le gaz carbonique sous pression comme fluide de refroidissement. La construction des quatre premiers débuta à Calder Hall, à côté de Windscale, en août 1953. Deux entrèrent en service en 1956, suivis des quatre réacteurs identiques de Chapelcross, au sud de l'Écosse, et de bien d'autres. Pendant longtemps — jusqu'au démarrage des grandes centrales américaines — l'Angleterre détint le ruban bleu de la production d'électricité d'origine nucléaire dans le monde.



1.38

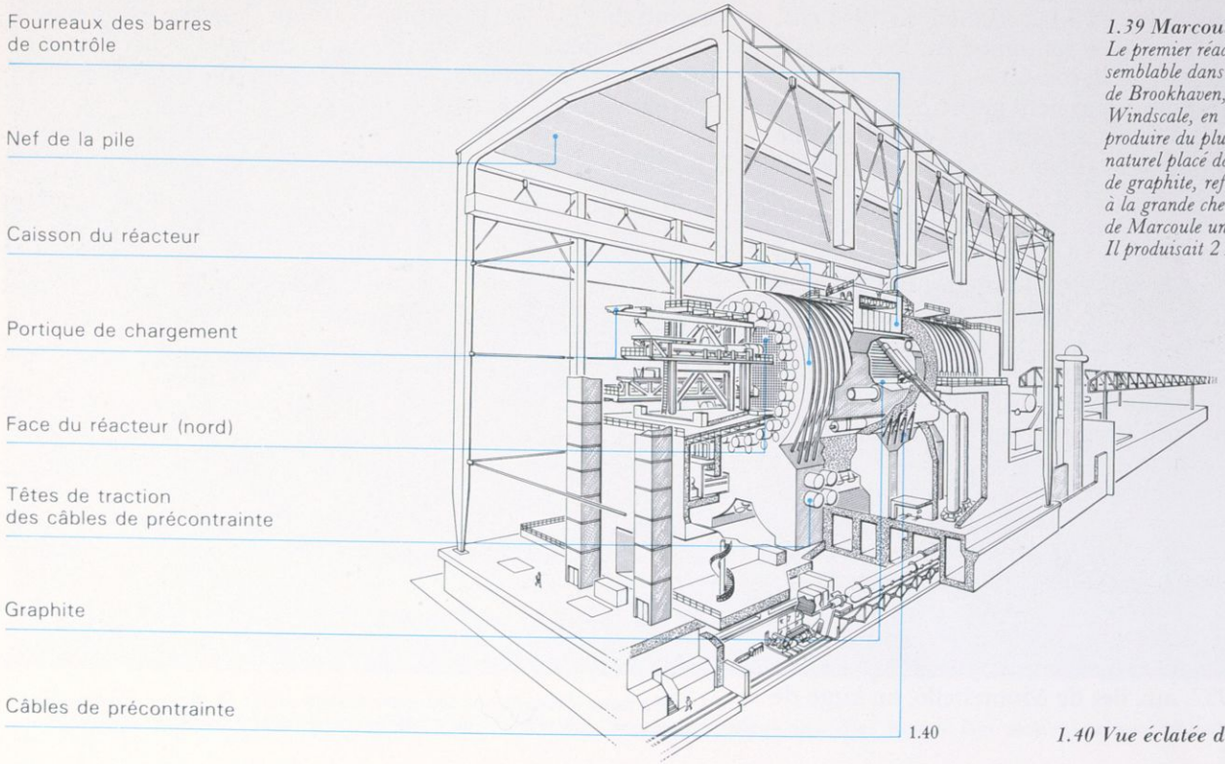
1.37 ***Calder Hall*** *(Cumberland): la centrale nucléaire de Calder Hall comporte quatre tranches de 50 MW dans la filière uranium naturel graphite-gaz. Tout à côté se trouve l'usine de retraitement de Windscale et celle de Sellafield.*

1.38 ***La reine d'Angleterre inaugure Calder Hall:*** *Sa Majesté Elisabeth II d'Angleterre inaugure le 17 octobre 1956 la centrale nucléaire de Calder Hall.*



1.39

1.39 **Marcoule :** *vue de G1 et de sa cheminée. Le premier réacteur de Marcoule était semblable dans son principe aux réacteurs de Brookhaven, près de New York, et de Windscale, en Grande-Bretagne. Destiné à produire du plutonium, il utilisait de l'uranium naturel placé dans un empilement de barres de graphite, refroidi par un courant d'air rejeté à la grande cheminée qui met dans le site de Marcoule une silhouette caractéristique. Il produisait 2 MW d'électricité.*



1.40

1.40 Vue éclatée du réacteur G2 de Marcoule.

Marcoule

L'évolution en France fut tout à fait semblable, un peu décalée dans le temps en raison de l'interruption totale due à la guerre. Dès sa création en 1945, le CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique) combla le retard dans les connaissances de base. Il construisit une série de réacteurs d'essais à eau lourde ; le premier, Zoé, divergea au fort de Châtillon en 1947. Le Commissariat prospecta l'uranium en France et dans l'Union française, et en garantit l'approvisionnement. En 1953, les temps vinrent de lancer un programme de production de plutonium à des fins nucléaires ou civiles. La voie retenue fut celle suivie par les Anglais, mais améliorée.

Le premier réacteur français de puissance G1 à Marcoule, commencé en mai 1954, divergea le 7 janvier 1956. D'une puissance de 40 MW thermiques, refroidi à l'air, il comportait une petite installation de récupération d'énergie et fonctionnera jusqu'en 1968. Il fut suivi de deux autres réacteurs six fois plus puissants, G2 et G3, associés à une installation produisant 40 MW électriques. Ces réacteurs ont fourni le plutonium nécessaire aux besoins militaires et la première bombe française explosa au Sahara, à Reggan, le 13 février 1960. Ils montrèrent aussi que l'électricité nucléaire était à la portée des techniciens français, et EDF décida dès 1955 d'engager la construction d'un réacteur projeté alors pour une puissance de 60 MW. Les travaux débutèrent à Chinon en 1957.

Pendant près de dix ans, de 1955 à 1965, l'uranium naturel fut le combustible le mieux adapté aux réacteurs développés dans les pays de la vieille Europe, jusqu'à l'avènement des réacteurs mis au point aux États-Unis



1.41

1.41 ***L'équipe de Zoé :*** *les physiciens et les ingénieurs qui ont construit le premier réacteur français. Modéré à l'eau lourde, utilisant de l'oxyde d'uranium, ce réacteur fonctionna à partir de 1947. De gauche à droite : Jules Guéron, Francis Perrin, Jean Stohr, Raoul Dautry, Irène Curie, Frédéric Joliot, Lew Kowarsky, Bertrand Goldschmidt.*

Dix ans de maturation (1955-1965)

Après les débuts prometteurs de 1955, les producteurs d'électricité américains restent sur la réserve. L'exportation prend le relais et l'Italie commande en 1958 à General Electric Garigliano, réacteur à eau bouillante de 150 MW (BWR, Boiling Water Reactor), et Trino Vercellese, PWR de 260 MW. La société franco-belge SENA suivra en 1961 avec Chooz, PWR Westinghouse de 260 MW (Pressurized Water Reactor, réacteur à eau sous pression.

C'est seulement en 1963 que démarrera aux États-Unis une première vague de commandes de centrales de puissance avec l'ordre donné à Westinghouse en 1963 par les propriétaires de Yankee Rowe pour construire Haddam Neck, aussi appelé Connecticut Yankee, PWR de 575 MW. D'autres ordres suivent la même année: San Onofre et Malibu pour Westinghouse, Oyster Creek et Nine Mile Point, réacteurs de 600 MW pour General Electric enfin récompensé de ses efforts par le marché national. La commande de Malibu (Californie) sera annulée peu après.

Babcock, après Indian Point 1 commandé en 1955 et mis en service en 1962, ne recevra aucun ordre avant 1967, et Combustion Engineering n'interviendra pas avant la commande de Palisades en 1966.

Une telle lenteur dans l'éveil du marché après le feu de paille de 1955 explique le second « round » de l'AEC qui tenta d'intéresser à des réacteurs de puissance modeste de petites compagnies d'électricité ou des régies municipales ou locales. L'AEC finançait la partie nucléaire de l'usine dont elle restait propriétaire. On construisit successivement :

— Elkriver (Minnesota), 100 % AEC, réacteur PWR de 22 MW. Construit par Allis-Chalmers, critique fin 1962 et arrêté fin 1967. Combustible à 93 % en U 235. Surchauffé par chaudière au charbon ;

— Piqua (Ohio), réacteur à modérateur organique de 11 MW. Construit à partir de 1959 par Atomics International et Aerojet General avec participation de 99,3 % de l'AEC, critique en 1963 et arrêté fin 1965. Combustible à 1,94 % en U 235. Modération et refroidissement par un fluide organique, le terphényl ;

— Pathfinder (Sioux Falls, Dakota du Sud), réacteur BWR à surchauffe nucléaire, 59 MW. Début de la construction en 1959, critique en 1964, arrêté en 1968 après avoir atteint sa pleine puissance en 1967. Construit par Allis-Chalmers avec participation de 25 % de l'AEC. Combustible à 3,2 % en U 235 ;

— Carolinas CVTR (Carolinas Virginia Tube Reactor), réacteur de 17 MW modéré et refroidi à l'eau lourde et utilisant des tubes de force. Construit à partir de 1960 par Westinghouse avec participation de 28 % de l'AEC, critique en 1963, à pleine puissance en 1964, arrêté en 1967. Combustible à 1,2-2 % en U 235 ;

— Peach Bottom 1 (Pennsylvanie), 40 MW, réacteur à haute température modéré au graphite. Construit à partir de 1962 par General Atomic, filiale de la Gulf Oil Company, avec participation de 38 % de l'AEC, critique en 1966, arrêté en 1974. Combustible uranium, thorium à 93 % en U 235 ;

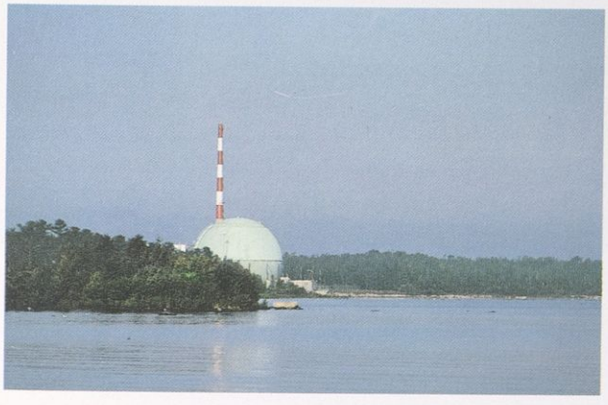
— Bonus (Boiling Nuclear Superheater Power Station), réacteur BWR à surchauffe, 17 MW. Construit à Porto Rico à partir de 1960 par Combustion Engineering et General Nuclear Engineering Co, avec participation de 75 % de l'AEC. Critique en début de 1964, en puissance en 1965, arrêté en 1968. Combustible à 2,4-3 % en U 235 ;

— Lacrosse (Wisconsin), réacteur BWR de 48 MW. Construit à partir de 1960 par Allis-Chalmers, critique en 1967, en puissance à partir de 1969, toujours en fonctionnement. Combustible à 3,6-3,9 % en U 235 ;

— Big Rock Point (Michigan), réacteur BWR de 72 MW. Construit à partir de 1960 par General Electric, toujours en service depuis 1963. Combustible à 3,5 % en U 235.

Ces tentatives pour développer un marché pour les réacteurs de faible puissance resteront sans lendemain. Au contraire, la subvention de centrales de grande taille rencontrera le succès. Commencée avec le réacteur PWR de San Onofre (375 MW, financé à hauteur de 20 % par l'AEC), elle se poursuivra avec Connecticut Yankee (15 % AEC). Un troisième projet, le réacteur BWR de Bodega Bay, fut abandonné presque aussitôt par le Los Angeles Department of Water Power sous la pression de l'opinion publique en raison de la séismicité du site. Au-delà, l'action de l'AEC fut jugée inutile alors que General Electric vendait Oyster Creek sans son aide. La vente de cette centrale marque le point de départ aux États-Unis de la commercialisation des unités de grande taille.

Le rôle moteur de l'AEC va ensuite disparaître. A l'exception d'une subvention à Fort Saint Vrain, cet organisme n'interviendra plus que pour construire des réacteurs ou des installations d'essais comme le prototype de surgénérateur de 400 MW thermiques FFTF (Fast Flux Test Facility) à Hanford. La dernière opération envisagée fut Clinch River, surgénérateur de 350 MW à partir de 1973. Malgré une dépense de deux milliards de dollars en matériel, le réacteur ne fut jamais construit, faute d'autorisation fédérale.

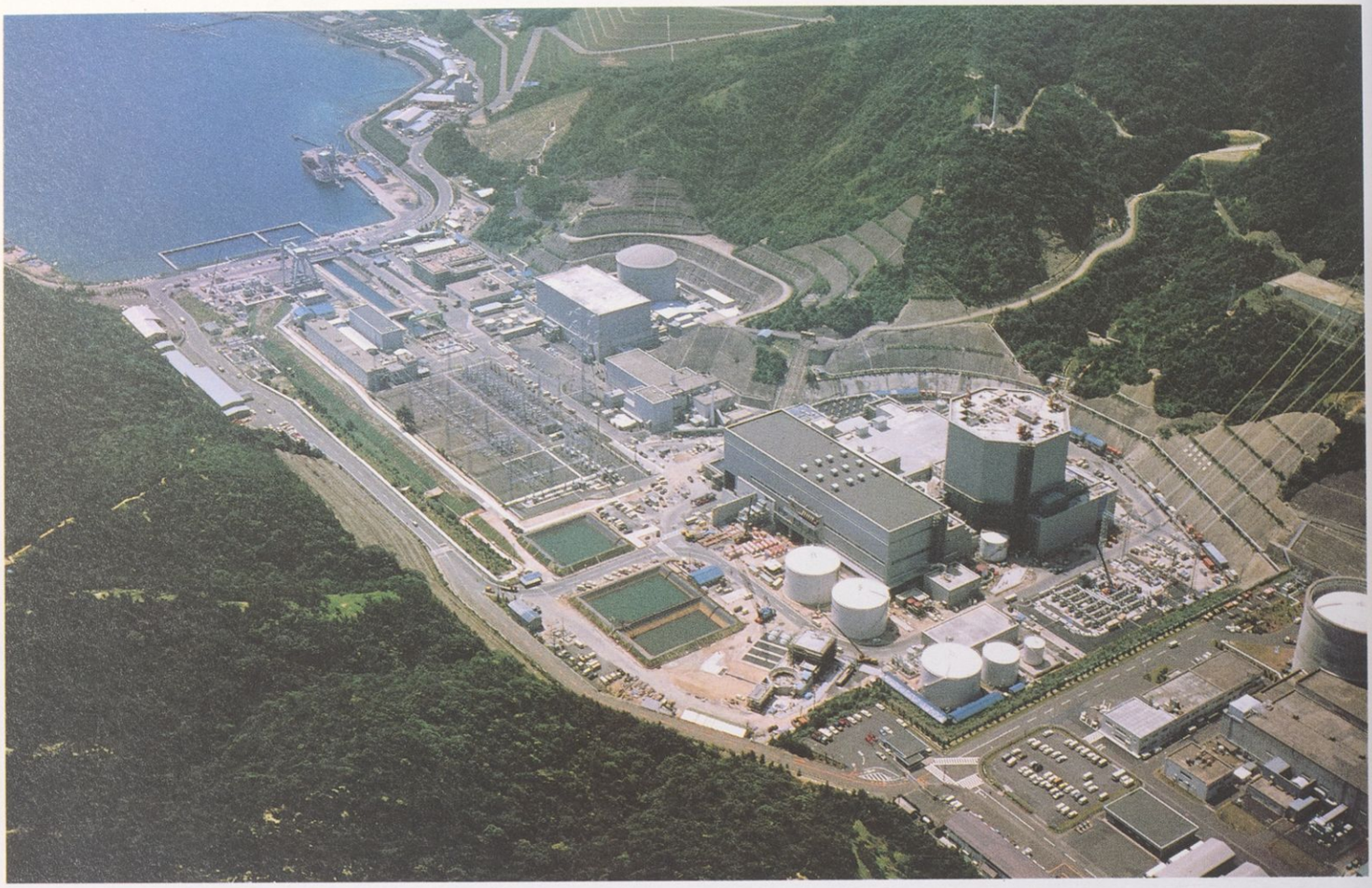


1.42

1.42 ***Big Rock Point*** *(Michigan): réacteur à eau bouillante de 72 MW. Construit par General Electric avec l'aide de l'AEC dans le cadre du programme destiné à intéresser à l'énergie nucléaire des producteurs de taille moyenne comme Consumers Power Company, son propriétaire.*

1.43 ***Sant'Elia: études pour la Ville Nouvelle - centrale électrique****, 1914. Encre et crayon sur papier 31×20,5 cm. Collection privée. Le monde industriel vu par un des principaux représentants du futurisme italien.*


Cavv
25 | 2 | 4 | 14



1.44

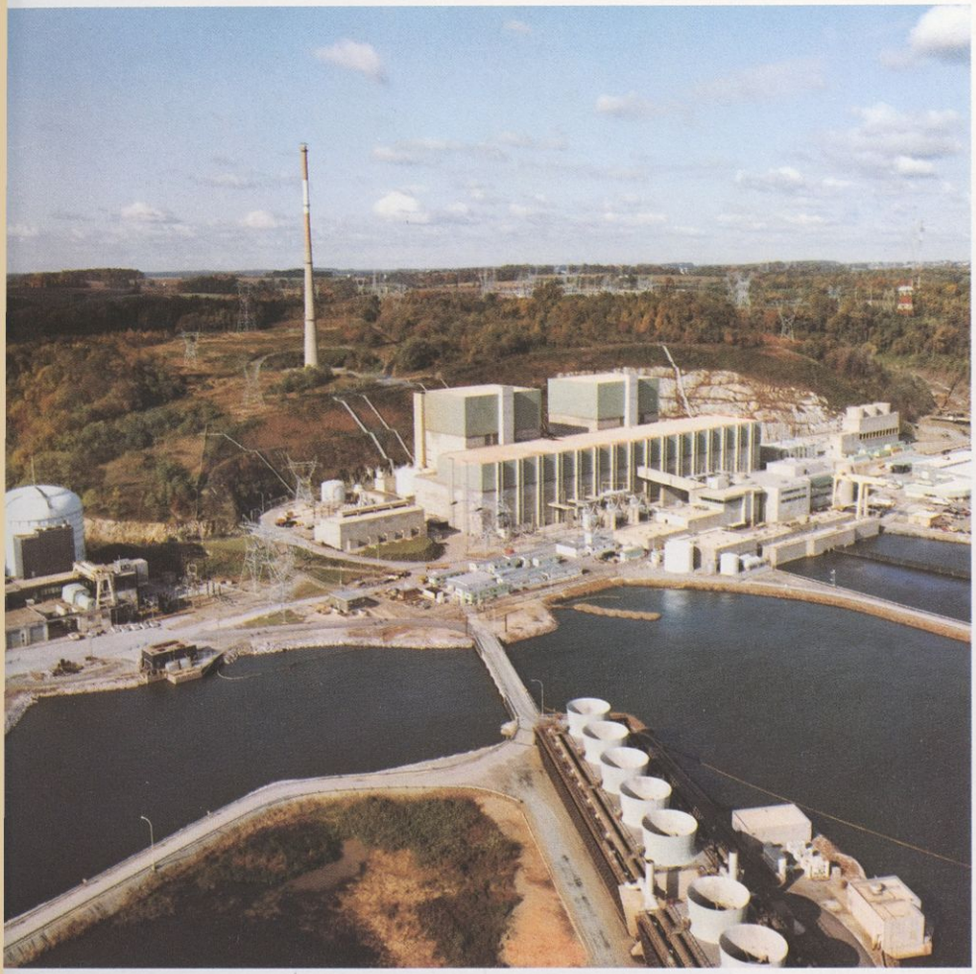
A la recherche de la compétitivité : les années 60

Pour bien comprendre le développement de l'énergie nucléaire à la fin des années 60, il faut se souvenir de l'atmosphère de cette époque. Une énergie de moins en moins chère, le pétrole, envahit le marché et chasse le charbon de la plupart de ses usages, sauf de la production d'électricité. Un climat d'enthousiasme pour le progrès technologique donne confiance aux entrepreneurs. Tout est possible, le monde semble illimité. Cependant, une crainte diffuse subsiste, celle que l'humanité manque un jour d'énergie ; crainte bien vite balayée par la découverte des gisements géants d'Arabie et du Moyen-Orient qui décuple d'un seul coup les réserves.

Chez les producteurs d'électricité, naguère limités au choix de brûler du charbon ou d'équiper les sites hydrauliques de leur pays, domine le souci de la rentabilité, l'obsession du kilowattheure le moins cher. L'énergie nucléaire semble à portée de la main et, tous en sont convaincus, l'année qui vient sera celle du progrès décisif et du lancement de la construction en série des réacteurs nucléaires. Pourtant, avant 1968, aucun type de réacteur ne s'impose réellement. Presque chaque pays, presque chaque grand consortium industriel prépare son modèle. L'imagination est maîtresse du terrain jusqu'à ce qu'elle bute sur les dures réalités de l'exécution et sur les contraintes financières. Les faibles puissances retenues pour les prototypes masquent une partie des difficultés. Oui, tout semble possible à des amours-propres nationaux jaloux de triompher.

Au début, deux tendances se dessinent. Certains pays avaient développé une industrie de séparation isotopique pour leurs besoins militaires, et disposent d'uranium enrichi. Les réacteurs qu'ils proposent sont adoptés à partir de 1960 par ceux qui acceptent leurs conditions draconiennes de contrôle. D'autres nations refusent ce qu'elles considèrent comme une soumission et veulent développer l'énergie nucléaire à partir de l'uranium naturel. On trouve dans le premier groupe l'URSS et les pays du CAEM (Conseil d'Assistance Économique Mutuelle), Tchécoslovaquie et Allemagne de l'Est en tête, et les États-Unis fournisseurs de la Belgique, de l'Italie, de l'Allemagne, de la Suède, de la Suisse, de l'Espagne et bientôt de l'Inde et du Japon. Dans l'autre groupe, on trouve le Canada et le Royaume-Uni, et jusqu'en 1968 la France. Leurs efforts ont été suivis par l'Italie, le Japon, l'Inde, qui veulent mener plusieurs expériences en parallèle, et par le Pakistan.

Les vieux réflexes des grands thermiciens classiques expliquent le foisonnement initial de réacteurs cherchant à tout prix le meilleur rendement thermodynamique, fût-ce au prix de la compétitivité initiale. Celle-ci devait venir ensuite. De là cette profusion de prototypes à surchauffe de la vapeur, de là cette course vers les hautes températures. Cette orientation technique était justifiée en période de pénurie de combustible.



1.45



1.46

1.44 ***Tsuruga*** *(Japon) : à gauche, le premier réacteur mis en service au Japon. Commandé en 1965, par General Electric, ce réacteur à eau bouillante fonctionne depuis 1969. A droite, la seconde unité de Tsuruga est un réacteur à eau sous pression de 1 115 MW construit par Mitsubishi Heavy Industries.*

1.45 ***Peach Bottom*** *(Pennsylvanie) : deux générations se succèdent sur ce site. A gauche un réacteur de 40 MW refroidi à l'hélium, prototype de la filière à haute température. Construit par Gulf General Atomic, il a fonctionné de 1966 à 1974. Au centre, deux tranches à eau bouillante de 1 065 MW. Commandées en 1966, elles sont entrées en service en 1974.*

1.46 ***Mise en place du réacteur intégré du cargo allemand « Otto Hahn » :*** *le réacteur construit par Deutsche Babcock et Interatom a une puissance de 38 MW thermiques. La cuve contient le cœur et trois générateurs de vapeur. Les appendices latéraux renferment les trois pompes primaires. Mis sur cale en septembre 1963, le cargo minéralier allemand « Otto Hahn » de 10 000 ch est entré en service fin 1968.*

Elle fut bientôt abandonnée dans les centrales classiques en raison de la baisse continuelle du prix du pétrole. Dans les centrales nucléaires, la diminution de consommation d'un combustible peu onéreux ne pesait pas lourd devant le surcoût des raffinements techniques utilisés. Dans les deux cas on alla vers une simplification qui se maintient encore pour les centrales nucléaires.

Le souci d'assurer l'avenir lointain, comme les remords des physiciens de si mal utiliser l'uranium ont fait souhaiter la mise au point de réacteurs plus efficaces. De cette époque datent les projets et les prototypes de réacteurs surgénérateurs. Cinq pays surtout développent cette technologie. Les États-Unis, bien sûr, où les sociétés privées marquent leur intérêt en construisant Enrico Fermi, près de Detroit. Le Japon s'associe à l'entreprise qui tournera court, comme nous l'avons vu. Les efforts principaux restent faits par le gouvernement fédéral, c'est-à-dire l'AEC. C'est toujours l'État qui finance en Angleterre où l'UKAEA (United Kingdom Atomic Energy Agency) construit le premier réacteur de Dounreay, DFR, et en France avec Rapsodie puis Phénix, œuvres du CEA. L'Union soviétique poursuit patiemment son programme à Melekess avec Bor 60 (60 MW thermiques) et bientôt avec la grande unité de Chevchenko dont la vapeur à partir de 1973 dessalera de l'eau de mer et produira 150 MW électriques. Pour ces réacteurs, l'heure est encore celle d'une enfance prometteuse.

Les réacteurs à haute température modérés au graphite et refroidis à l'hélium suscitent deux espoirs : l'utilisation directe des températures élevées, en aciérie ou en chimie ; la conversion en uranium 233 fissile du thorium 232, dont il existe des réserves aussi importantes que celles d'uranium. General Atomic, filiale du pétrolier Gulf Oil Company, construira à partir de 1968 à Fort Saint Vrain un réacteur de 300 MW. Critique en 1974, sa montée en puissance sera si pénible que General Atomic résiliera les commandes de Fulton en Pennsylvanie et de Sainte Rosalie en Louisiane. En Europe, après le prototype Dragon construit en Angleterre par l'OCDE, l'Allemagne fédérale seule persistera dans la voie des réacteurs à haute température.

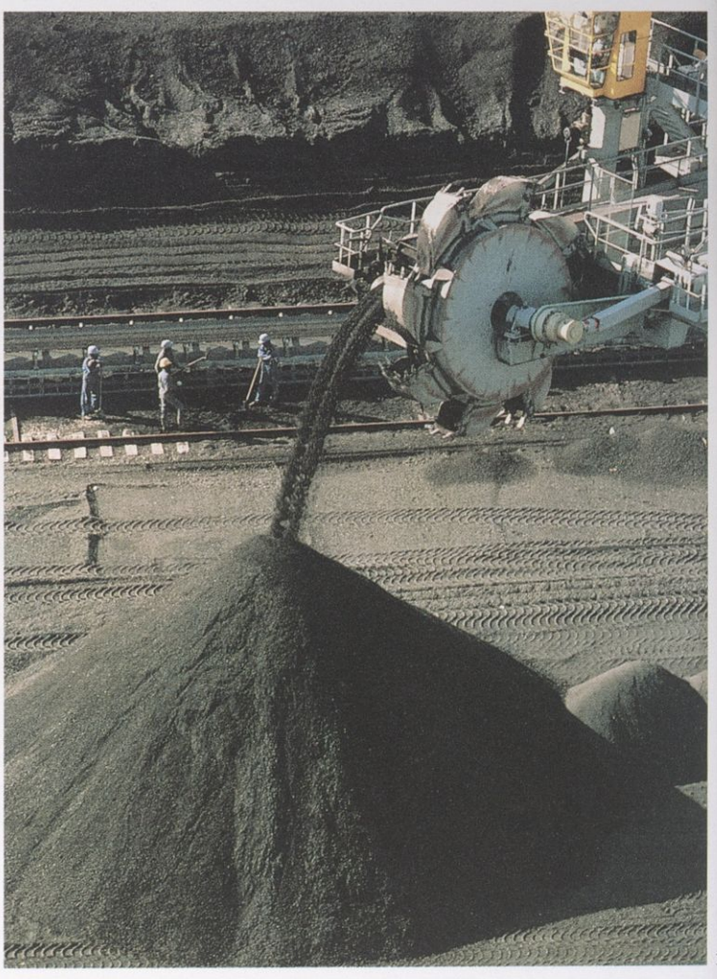
A ce moment est faite une tentative de marine civile nucléaire. Les bâtiments militaires, sous-marins, porte-avions et frégates ainsi que les brise-glaces soviétiques montrent la voie. Trois pays vont construire des navires commerciaux. Les Américains mettent en service en 1962 un cargo mixte de 10 000 tonnes et 22 000 chevaux, le *Savannah,* les Allemands un minéralier de 15 000 tonnes et 10 000 chevaux, l'*Otto Hahn,* fin 1968, et les Japonais le cargo mixte *Mutsu-Maru* en 1973. Après quelques parcours de prestige, ils seront désarmés sous la conjonction d'une rentabilité douteuse et des difficultés qu'ils rencontrent à relâcher dans les ports. L'absence d'une réglementation internationale en matière de sûreté y fut pour beaucoup. Paradoxalement, l'accueil des navires nucléaires militaires se fait sans difficultés, celui des navires civils suscite la méfiance et la peur.

Le contexte énergétique des années 70-80

Jusqu'à la guerre du Kippour en octobre 1973, le pétrole va régner sans partage. Son prix en monnaie constante baisse jusqu'en 1970. La consommation mondiale d'énergie augmente à un rythme de 6 à 7 % par an, atteignant l'équivalent de près de 6 milliards de tonnes de pétrole en 1973, dont 45 % en pétrole, 30 % en charbon ou lignite, un peu moins de 20 % en gaz naturel, les ressources hydrauliques et l'énergie nucléaire représentant environ 10 %. La crise de 1973 va freiner pour un temps cette évolution. Le pétrole, qui, de 1,8 dollar le baril en 1970, était passé à près de 4 dollars avant la guerre du Kippour, triple son prix après la décision de l'OPEP (Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole), de tirer un meilleur parti de cette ressource non renouvelable. C'est ce qu'on est convenu d'appeler le premier choc pétrolier. Selon leur situation géopolitique, leur système économique et leur attitude vis-à-vis du libéralisme, les différents pays réagissent chacun à leur manière. La consommation d'énergie stagne pendant trois ou quatre ans avant de repartir et le monde entier prend sa part de la nouvelle donne pétrolière : les énergies concurrentes tentent de revenir en force, le charbon et le gaz surtout ; les compagnies pétrolières développent les gisements offshore et suscitent de nouvelles régions productrices ; les consommateurs enfin s'efforcent de réduire leur demande. Dans les discours tout au moins, sinon dans les faits.

En 1978, une seconde augmentation vient secouer à nouveau les économies. Sans être la cause principale de la crise, elle en aggrave les conditions. Pendant plusieurs années, le monde craint de manquer d'énergie ; les opérateurs amplifient la menace de pénurie, mettent l'accent sur l'épuisement des ressources. Les mouvements écologiques emboîtent le pas et réclament l'avènement des énergies renouvelables. Or, le temps passe sans que se produisent les catastrophes annoncées. Le monde digère péniblement la crise et les lois du marché ramènent durement à la raison : l'énergie est une composante importante des économies, mais une composante seulement, et sa rareté doit s'apprécier en tenant compte des autres raretés. Une politique énergétique doit être définie en fonction de ces éléments. Elle doit intégrer le niveau d'indépendance énergétique raisonnablement possible pour un pays donné. Économiser l'énergie est souhaitable, mais pas à n'importe quel prix. Si l'on ajoute à cela que la conduite des hommes ou des États n'est pas entièrement rationnelle et que la régulation due au jeu du marché et de ses acteurs n'est ni instantanée ni parfaite, on sera porté à juger moins sévèrement les déclarations d'intention, les retournements des politiques énergétiques ou l'absence de celles-ci dans plusieurs grandes nations. On comprendra pourquoi le pétrole conserve sa primauté et pourquoi des sources d'énergie aussi séduisantes pour l'esprit que la fusion thermonucléaire, les surgénérateurs ou, dans un autre domaine, l'huile de distillation des schistes bitumineux, la gazéification du charbon, l'utilisation des sables asphaltiques ou encore l'énergie solaire font l'objet de recherches sans qu'on passe à une production de masse encore trop coûteuse et inutile aujourd'hui.

A la fin de 1985, l'OPEP a baissé ses prix pour reconquérir sa part du marché. La maîtrise de celui-ci lui a bientôt échappé et nous sommes entrés dans une période de surproduction. La concurrence entre les producteurs est avantageuse dans l'immédiat pour les consommateurs. Pour combien de temps, nul ne se hasarde à le prévoir. A la fin des années 80 le jeu économique donne une image brouillée qui pourrait inciter au laisser-faire. Ce serait dangereux dans un domaine où les illusions coûtent d'autant plus cher qu'une dizaine d'années s'écoule entre les décisions de principe et la première production d'un nouveau gisement ou d'une nouvelle usine nucléaire. L'exemple de la France d'aujourd'hui montre les avantages tirés d'une politique énergétique résolue et opiniâtre. Une certaine indépendance est possible au bénéfice des consommateurs, et la répartition entre les sources d'énergie peut temporairement varier. La pénurie physique est lointaine, mais l'épuisement des ressources en pétrole et en gaz est inéluctable à la distance de trois ou quatre générations. D'ici là, bien des tensions sont possibles et le recours à l'énergie nucléaire demeure une nécessité, pour la France évidemment mais pour le reste du monde aussi.

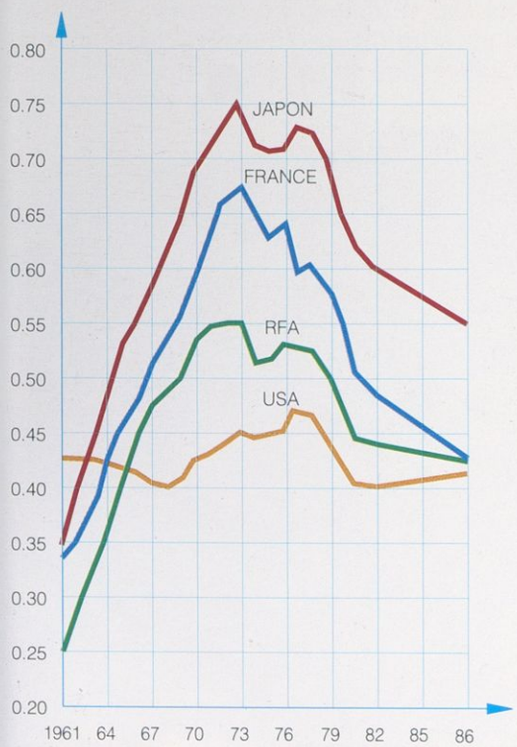


1.47



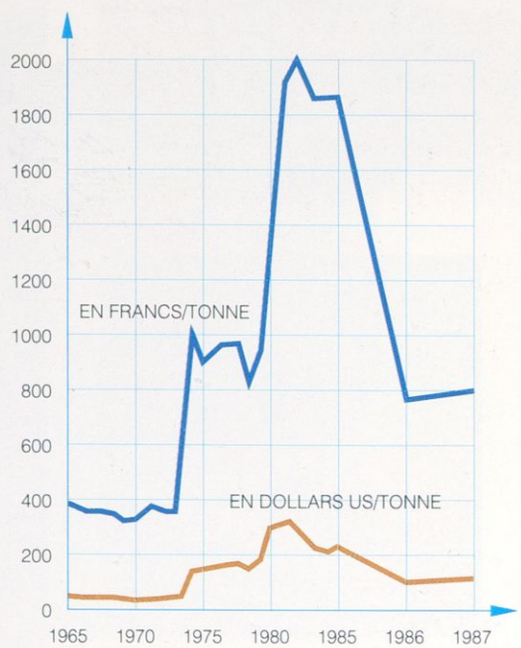
1.48

PART DU PETROLE DANS LA CONSOMMATION D'ENERGIE PRIMAIRE



EVOLUTION DU PRIX DU PETROLE BRUT IMPORTE EN FRANCE

A MONNAIE CONSTANTE DE 1984



1.50

1.47 Le charbon : *l'énergie d'hier et celle de demain.*

1.48 Champ de pétrole : *derricks et torchères au pays de l'or noir.*

1.49 Part du pétrole dans la consommation d'énergie primaire : *moins marquée aux États-Unis et en Allemagne fédérale en raison de l'importance du charbon, l'évolution a été la même dans les grands pays industriels. Le pétrole a pris une part croissante dans les années 60, a culminé en 1973. Les efforts de substitution ont ensuite diminué sa part relative qui reste partout prépondérante.*

1.50 Évolution du prix du pétrole brut importé en France : *les variations brutales en 1974, 1979-80 et fin 1985 sont visibles, amplifiées par la conversion des dollars en francs.*

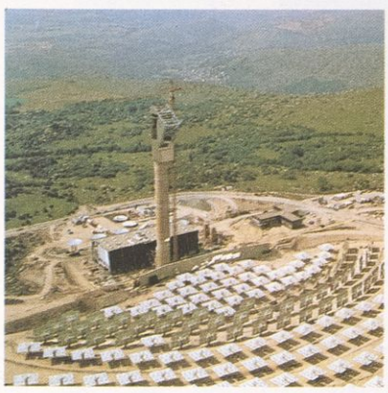
1.51



1.52

1.54





1.53

1.51 ***Plate-forme pétrolière de Frigg :*** *le pétrole offshore de la mer du Nord est une des nouvelles sources d'approvisionnement développées après les deux premiers chocs pétroliers.*

1.52 ***Isolation thermique :*** *le premier gisement à exploiter est celui des économies d'énergie. L'isolation des locaux d'habitation, peu spectaculaire, est un des moyens les plus efficaces.*

1.53 ***Thémis :*** *le champ de miroirs de la centrale expérimentale française située à Targassonne, dans les Pyrénées-Orientales, renvoie les rayons du soleil sur une chaudière placée au sommet d'une tour.*

1.54 ***Pose d'un gazoduc :*** *le transport du gaz, énergie souple, commode et propre, se fait par un réseau de gazoducs.*

Les réponses aux crises de l'énergie

Économiser l'énergie

Le premier gisement d'énergie à exploiter, c'est d'éviter le gaspillage. L'augmentation des prix de l'énergie y conduit tout naturellement et la stagnation pendant plusieurs années de la consommation mondiale traduit tout à la fois la crise et la réduction de consommation. Selon les contraintes géographiques, selon les habitudes, les économies d'énergie sont plus ou moins aisées. Après une première phase de simple chasse au gaspillage, il faut aller plus loin et accepter d'investir pour modifier les procédés industriels ou les installations de chauffage.

Développer de nouveaux gisements

Pour se dégager des contraintes nouvelles introduites par les pays de l'OPEP, les opérateurs traditionnels sur le marché pétrolier ont tiré parti de l'augmentation même du prix moyen du pétrole. Des ressources jusque-là connues mais inexploitables en concurrence avec les coûts réels d'extraction au Moyen-Orient sont devenues rentables. Le miracle énergétique de la mer du Nord a masqué en Angleterre le déclin des charbonnages. Il a fait la richesse de la Norvège. On a redécouvert le Mexique. Le développement des régions nouvelles d'extraction a compensé et au-delà les difficultés nées du conflit entre l'Irak et l'Iran, et, sans avoir pu empêcher les augmentations du prix de 1978, la surproduction a fait voler en éclats pour un temps le front uni de l'OPEP qui ne fournit plus aujourd'hui que 30 % de la consommation de pétrole, au lieu de 60 % en 1973.

Substituer au pétrole d'autres énergies

Le principal bénéficiaire de la crise pétrolière est le gaz naturel, déjà en forte expansion auparavant. Les efforts de prospection anciens ou nouveaux en ont augmenté les réserves au-delà de cinquante ans de consommation au rythme actuel. La fraction perdue de gaz fatal lors de l'extraction pétrolière est ressentie de plus en plus comme le gâchis d'une ressource rentable. Commode à l'emploi, le gaz est ralenti dans son expansion par les investissements qu'il implique et par les liaisons d'interdépendance étroite qu'il établit entre producteurs et consommateurs.

Le charbon se transporte avec difficulté et le marché international ne porte que sur 10 % de la production totale. La teneur en soufre de nombreuses sortes de houille et de lignite nécessitera fatalement de désulfurer les gaz de combustion et alourdira le coût de l'énergie qu'il fournit. Les tonnages augmenteront, mais peut-être pas aussi vite ni autant qu'on ne l'imaginait il y a quelques années. On voyait alors sa consommation décupler en trente ou quarante ans, alors qu'elle a mis vingt ans à doubler. Une semblable progression paraît difficile compte tenu du coût des investissements nécessaires.

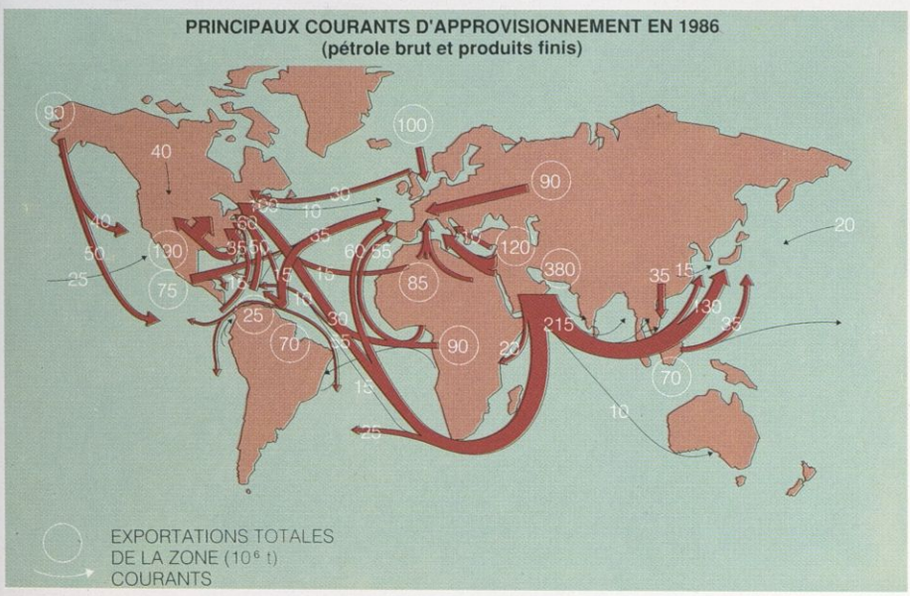
L'énergie nucléaire a fait ses preuves pour la production d'électricité. C'est une solution avantageuse partout où son développement ne se heurte pas à des obstacles psychologiques, administratifs ou à l'existence d'autres ressources d'accès facile. Sa part déjà importante dans la production d'électricité va s'accroître dans les prochaines années simplement par la mise en service des unités en construction. De nouveaux programmes pourraient relancer sa croissance.

Ajoutons enfin la crainte récente née de l'augmentation de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère. Un recours excessif à la combustion des produits carbonés pourrait avoir des conséquences irréversibles sur le climat de notre planète. Fondée ou non, cette interrogation fait peser une menace sur l'extension de l'usage des combustibles fossiles.

Les énergies nouvelles sont pour longtemps encore du domaine du rêve ou du discours. Partout des sommes importantes ont été dépensées en recherches, sans atteindre la compétitivité industrielle. Sauf à coups de subventions, ces énergies ne peuvent concurrencer le pétrole, ni en France, ni aux États-Unis, ni dans les pays en développement.

Tendances à long terme

Avec le temps, le prix d'une ressource non renouvelable comme le pétrole ne peut que monter. Mais des retournements de conjoncture peuvent l'orienter temporairement à la baisse, comme le montre l'action menée par l'OPEP fin 1985 pour reconquérir sa part du marché. Une politique énergétique cohérente vise le long terme et de tels soubresauts risquent de l'affecter en décourageant les économies d'énergie ou l'usage du charbon. Le développement de l'énergie nucléaire, même s'il n'est pas remis en cause, peut en être momentanément freiné.



1.55

1.55 Carte des flux pétroliers dans le monde à économie de marché : les grandes zones de production sont le Moyen-Orient, les États-Unis, l'URSS, l'Amérique des Caraïbes et le golfe de Guinée. Les grandes zones de consommation sont les États-Unis, l'Europe, le Japon et l'URSS.