

Ndlr : Le texte de cet article est tiré d'une conférence prononcée par l'auteur en Mars 2007. Un certain nombre d'évènements postérieurs nous ont amenés à faire quelques mises à jour qui complète le texte original sans en trahir l'esprit.

Comment découper les 110 années d'histoire nucléaire ?

Trois périodes semblent se détacher :

- La première, la plus étonnante, tout entière consacrée à la recherche scientifique sur l'atome, va de 1895 aux années 1940.
- La seconde correspond à l'édification et à la mise en route d'une véritable activité nucléaire en FRANCE, dans l'enthousiasme et l'effervescence des commencements. Elle s'achève au début des années 1970.
- La maturité atteinte, la dernière période nous conduit au cadre contemporain, dans lequel on s'efforcera de mettre en évidence les défis qui restent à relever.

SOMMAIRE

Introduction

I - L'aventure scientifique de l'atome : 1895 -1945

II - La création d'une activité nucléaire en France 1945 -1970

III - La période contemporaine et les questions d'aujourd'hui

Bibliographie

1 - L'AVENTURE SCIENTIFIQUE DE L'ATOME 1895 – 1945

La découverte de la structure interne de l'atome et de ses propriétés est une extraordinaire illustration de la démarche scientifique.

Le progrès de la science trouve sa source dans l'esprit de curiosité, dans cette inlassable soif de comprendre le monde qui nous entoure et ses singularités. Il faut beaucoup de persévérance et d'intuition pour avancer dans cette voie, un grand savoir-faire pour monter des expérimentations significatives, une certaine humilité aussi pour s'incliner devant les faits constatés, une prodigieuse imagination enfin pour éclairer dans une explication globalisante des phénomènes apparemment sans lien entre eux. Nous en verrons l'application dans les pages qui suivent.

En cette fin du XIX siècle, rien ne laissait prévoir que l'atome connaîtrait cette histoire fantastique.

Quelques décennies plus tôt, son existence était encore contestée, faute de pouvoir la démontrer de façon observable. Les progrès

de la chimie (et notamment les travaux de MENDELËEV et son tableau de classification périodiques des éléments selon leur poids atomique) réussirent à la faire admettre. Mais l'atome restait fidèle à sa définition d'origine, héritée des Grecs (a-tomos : qui ne se coupe pas) et était censé constituer l'élément le plus infime de la matière.

A cette époque, l'intérêt des scientifiques était ailleurs et se portait plutôt sur la lumière et l'électricité et sur les manifestations curieuses qui les accompagnaient. Ce sont ces interrogations qui vont donner le coup d'envoi à l'aventure atomique.

LE POINT DE DEPART - 1895 – 1903

Tout à coup, en quelques années, une série de découvertes vient ébranler les esprits.

En 1895, à WÜRZBURG, Conrad RÖNTGEN s'interroge sur cette étrange lueur blafarde qui relie la cathode à l'anode quand on fait passer un courant électrique dans un tube cathodique. S'agit-il d'ondes ou de particules électrisées ? RÖNTGEN a l'idée d'interposer un carton entre le tube et l'écran fluorescent qui sert de détecteur. Quelle n'est pas sa surprise de voir apparaître sur l'écran le squelette de sa main ! Il venait de réaliser la première radiographie. Cette invention va connaître très vite des applications médicales ; mais faute de bien comprendre encore la nature du phénomène, on parlera de rayons «X».

Plus près de nous, à PARIS, dans son laboratoire au Muséum d'Histoire Naturelle du Jardin des Plantes, Henri BECQUEREL essaie de trouver une explication à la fluorescence, cette propriété de certains corps de restituer la lumière qu'ils ont reçue. Parmi ces éléments figurent les sels d'uranium : exposés au soleil, puis posés devant une plaque photographique, ils font apparaître, comme les rayons X, la forme d'un objet placé devant eux. Plus étonnant encore, et c'est ce que découvre BECQUEREL en 1896, le même résultat est obtenu lorsque

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

L'uranium n'a pas été exposé à la lumière. Sa perplexité est tout aussi grande que celle de RÖNTGEN. Quels sont ces rayonnements que nulle électricité ni lumière ne viennent expliquer ? Dans l'embarras, il les appelle modestement «rayons uraniques».

C'est alors qu'entrent en scène deux figures légendaires de la science française :

Pierre et Marie CURIE

Fils de médecin, Pierre est né en 1859. Après avoir hésité sur son orientation, il opte pour la Physique où ses qualités d'expérimentateur sont vite remarquées. En 1890, il est Chef de Travaux à l'École Supérieure de Physique et Chimie de Paris.



Maria SKŁODOWSKA naît en 1867 à Varsovie dans une Pologne alors dominée par la Russie tsariste. Elle connaît une jeunesse difficile dans une famille éprouvée par les deuils et les difficultés matérielles, au milieu d'une société défavorable à la promotion féminine. Elle se résout à rejoindre sa sœur à Paris où elle entame des études brillantes. Marie rencontre Pierre en 1894 à propos de travaux sur le magnétisme. Il faut croire que le magnétisme n'a pas joué seulement sur le plan scientifique, puisque l'année suivante, les deux jeunes gens se marient.

Marie est autorisée à mener ses travaux de thèse auprès de son époux. Quel sujet pourraient-ils bien choisir ? Vous avez deviné : ils vont tenter de percer le mystère des «rayons de M. BECQUEREL».

Commencent alors de véritables «travaux d'Hercule» menés dans un appentis de l'École de Chimie, qui vont les conduire à traiter des centaines de kg de minerai d'uranium de Bohême pour les concasser et les attaquer à l'acide, dans une

atmosphère insalubre, sans parler des radiations dont ils ne soupçonnent pas le danger. Marie découvre d'abord, en 1898, que le thorium possède les mêmes propriétés de rayonnement que l'uranium et, chose plus surprenante encore, que des minerais d'uranium sont plus actifs que l'uranium lui-même, comme si (pour reprendre la comparaison amusée de Claude ALLEGRE, dans son livre «*Un peu de Science pour tout le monde*», dont je me suis largement inspiré et dont je vous recommande la lecture) «*le pastis dilué dans l'eau était plus fort que le pastis pur*». Marie a très vite l'intuition que ces minéraux contiennent d'autres corps. En compagnie de Pierre, ils vont isoler un premier élément, auquel on donnera le nom de polonium, en hommage à la patrie de Marie, puis un second encore plus actif : le radium. Parallèlement, ils étudient les différents types de rayonnements rencontrés.

Pierre et Marie CURIE ont ainsi mis en évidence la propriété particulière d'une famille d'éléments : la radioactivité.

Pour cette découverte capitale, ils recevront en 1903, en même temps qu'Henri BECQUEREL, le Prix NOBEL de Physique. Pierre disparaîtra trois ans après, renversé par un attelage de chevaux. Marie poursuivra seule les recherches en se concentrant sur le radium.

Restait à trouver une explication scientifique à la radioactivité. Il reviendra à Ernest RUTHERFORD d'en fournir les premiers éléments. Ce jeune physicien anglais d'origine néo-zélandaise s'intéresse aux travaux du trio français. Il émet l'hypothèse audacieuse que les éléments radioactifs réunis autour de l'uranium et du thorium sont liés entre eux par une sorte de filiation. L'élément le plus lourd perd de sa substance par désintégration partielle pour donner naissance à un autre élément et ainsi de suite en une chaîne de transmutations. L'alchimie qui avait fait rêver nos ancêtres devenait une réalité scientifique. C'était admettre en même temps que l'atome n'était plus un élément indivisible et inaltérable.

Nous sommes en 1903 ; la deuxième phase de l'aventure atomique va pouvoir s'engager.

A LA RECHERCHE DE LA STRUCTURE INTERNE DE L'ATOME 1903-1932

Peu à peu, l'idée de particules émises par les atomes fait son chemin dans les esprits. Elles permettent d'expliquer les rayons qui sortent des tubes cathodiques de M. RÖNTGEN. Chargées électriquement, on les appelait aussi électrons. L'atome ne serait-il pas composé d'électrons ? La thèse est séduisante, mais manque de cohérence car leur charge électrique est négative, alors que les atomes sont neutres. Au sur-

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

plus, leur masse est infime et il en faudrait des milliers pour expliquer celle de l'atome.

A nouveau, RUTHERFORD va faire franchir un pas décisif, en 1910, avec une expérience de bombardement d'une feuille très mince d'aluminium par des rayons alpha de polonium. Grâce à un appareillage adapté permettant de suivre la trajectoire des rayonnements, il constate que la plupart d'entre eux traversent la feuille d'aluminium en ligne droite, quelques uns sont déviés et un petit nombre semble rebondir sur l'obstacle.

C'est là que RUTHERFORD place son interprétation magistrale : le point dur sur lequel rebondissent les rayons est un noyau d'une masse importante, le noyau de l'atome. Sa charge électrique est positive puisque les rayonnements négatifs sont déviés. Et il arrive à la conclusion, aujourd'hui évidente, mais révolutionnaire à l'époque : *«l'atome est un système solaire en miniature»*. Il pense même que le noyau pourrait être composé de plusieurs éléments.

Aussi brillante que soit cette théorie, elle demandait pourtant à être confirmée. Un point «accrochait» dans le raisonnement. Les lois de l'électromagnétisme applicables à un milieu électrisé comme celui de l'atome devraient conduire rapidement les électrons à s'effondrer sur le noyau. Or, il n'en est rien. Le Danois Niels BOHR s'attaque au problème en liaison avec RUTHERFORD. Doté d'une incroyable capacité d'innovation, il en vient à penser que l'infiniment petit n'obéit pas aux mêmes règles que le monde visible. Ce n'est pas la Physique classique qui s'applique à l'atome, mais la physique quantique découverte par Max PLANCK pour le rayonnement de la lumière. Il est difficile de rendre compte de cette théorie fort complexe. Disons, en simplifiant, qu'au lieu d'évoluer en continu, l'infiniment petit opère par paliers et par bouffées. C'est ainsi que les électrons sont inscrits dans le volume de l'atome sur des orbites en quelque sorte préétablies. Albert EINSTEIN essaiera toute sa vie d'imaginer une synthèse entre les deux Physiques sans y parvenir.

On peut s'étonner au passage que les idées émergent, tantôt dans un pays, tantôt dans un autre, dans une continuité apparente. Nous raisonnons en fonction du contexte actuel de la recherche, structurée autour de grands organismes comme le CNRS, l'INERIS ou le CEA, dotés de programmes pluriannuels et de moyens lourds. La réalité de l'époque était tout autre. Il s'agissait de petits labos comprenant une poignée de chercheurs, installés dans des locaux modestes avec des équipements très légers. On travaillait encore sur un coin de «paillasse» (ces solides tables en bois recouvertes de carreaux de céramique) et il était facile de passer d'un thème à l'autre. Les contacts entre labos d'un pays à l'autre étaient

plus aisés qu'on ne l'imagine pour la bonne raison, qu'hier comme aujourd'hui, la seule manière de préserver l'antériorité d'une expérience - récompense de la découverte - est de publier un article dans une revue scientifique, dont s'emparent aussitôt les concurrents pour tenter d'aller plus loin. La mobilité des initiatives est plus grande lorsque les moyens mis en œuvre sont plus légers.

Les découvertes de Niels BOHR se situent en 1913. L'année suivante éclate la première guerre mondiale qui restera indifférente aux recherches atomiques, lesquelles relèvent encore de la spéculation scientifique. Elles n'intéressaient d'ailleurs pas grand monde à l'époque en dehors de quelques cercles d'initiés. Seules, les applications des rayons X connaîtront un certain retentissement. Marie CURIE se distingue en prenant la responsabilité du service Radiologie de la Croix Rouge. Les «*petites Curie*», comme on appelait familièrement les camionnettes équipées de tubes à rayons X, rendront les plus grands services sur le front pour détecter fractures et éclats d'obus.

La marche en avant de la recherche reste quelque peu discrète avec les années 1920. Le temps, peut-être, pour la seconde génération des Curie de faire son apparition. Irène, fille aînée de Pierre et Marie, est née en 1897. Très tôt, elle est associée aux travaux de sa mère à laquelle elle est très liée depuis la mort brutale de son père. A 18 ans, elle est responsable d'un service radiologique dans un hôpital militaire près du front. En 1919, on la retrouve à l'Institut du Radium où elle sera nommée successivement préparatrice puis assistante auprès de sa mère. Le nouveau préparateur qui lui succèdera en 1924 s'appellera Frédéric JOLIOT.

Plus jeune qu'Irène (il est né en 1900), Frédéric est issu d'une famille de négociants. Il est vivement intéressé par les sciences et l'expérimentation. Il sort Major de l'École de Physique et Chimie de Paris (celle des Curie !) en 1923. L'année suivante, il intègre l'Institut du Radium comme il vient d'être dit. Entre le jeune préparateur et l'assistante, le «*magnétisme*» jouera une fois encore et se conclura par un mariage en 1926.

Marie CURIE, pour sa part, poursuivra ses travaux jusqu'à la limite de ses forces. Rongée par les radiations, les mains brûlées par les matières nucléaires, elle meurt le 4 juillet 1934 dans un sanatorium sur le plateau d'Assy. La France réservera des funérailles nationales à cette femme d'exception, prix NOBEL à deux reprises.

Revenons à l'odyssée de l'atome. Le début des années 1930 renoue avec le succès. Trois équipes de physiciens vont se succéder pour aboutir à la découverte des neutrons.

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

En Allemagne d'abord, W. BOTHE et H. BECKER remarquent que le bombardement du béryllium par des particules alpha donne naissance à un rayonnement très pénétrant. Irène et Frédéric JOLIOT-CURIE reprenant l'expérience observent en outre que ce rayonnement peut projeter des protons. C'est l'anglais James CHADWICK en 1932 qui «rafle la mise» en expliquant ces phénomènes par l'existence dans le noyau des atomes, à côté des protons, de particules assez lourdes, électriquement neutres, auxquelles on donnera pour cette raison le nom de neutrons.

La boucle est bouclée. Il aura fallu près de 40 ans d'expérimentations, de réflexions et d'efforts incessants des physiciens de toute l'Europe pour en arriver à la composition de l'atome, telle que nous la connaissons aujourd'hui.

On aurait pu en rester là ; c'est raisonner sans compter avec la curiosité inlassable des chercheurs.

MISE EN EVIDENCE DE L'ENERGIE NUCLEAIRE ET DE SES APPLICATIONS : 1932 – 1939



Irène et Frédéric Joliot-Curie

Avec les neutrons, les scientifiques disposent d'un «nouveau jouet», d'un nouveau projectile, qui présente le grand avantage de ne pas être repoussé par la charge électrique du noyau, quand on essaie de l'atteindre.

La Physique Nucléaire va pouvoir commencer.

Avant d'aller plus loin, arrêtons-nous un instant sur la découverte de la radioactivité artificielle à laquelle les noms d'Irène et de Frédéric JOLIOT-CURIE resteront attachés. Fin 1933, à partir d'une expérience de bombardement d'une feuille d'aluminium par une source intense de polonium, ils mettent en évidence la production de phosphore 30 radioactif, isotope du phosphore 30 naturel. Qu'est ce à dire ? Cela signifie que l'on est capable de fabriquer par irradiation des éléments ayant les mêmes propriétés que les éléments naturels, plus une : la radioactivité. L'isotope radioactif pourra être repéré, là où l'élément naturel est indétectable. On voit rapidement toutes les applications qu'il est possible d'en tirer, notamment dans le domaine médical (la scintigraphie de la thyroïde, par exemple, est possible grâce à une injection d'iode radioactif, qui va, comme l'iode ordinaire, se concentrer dans la glande).

Cette technique connaîtra un grand développement et vaudra à la famille Curie de compléter sa prestigieuse collection de Prix Nobel par une distinction supplémentaire en 1935.

Pendant ce temps, les labos européens s'emploient activement à bombarder les noyaux. L'idée en vogue est de tenter de créer des éléments nouveaux par capture d'un neutron projectile par un noyau cible. L'uranium est le plus souvent utilisé pour ce type d'opération. On croit avoir observé de nouveaux corps. Puis vient une interrogation sur la présence de baryum constatée à la fin de certaines expériences. D'où peut-il bien provenir ? (Sa masse atomique est un peu supérieure à la moitié de celle de l'uranium). Les imaginations ayant sans doute été déjà trop sollicitées dans cette aventure scientifique, il ne vient à l'idée de personne que le noyau pourrait se fragmenter. De personne... sauf de Lise HEITNER et Otto FRISCH, deux Allemands exilés en SUEDE, qui trouvent en décembre 1938 l'explication capitale de l'énergie nucléaire : le phénomène de la Fission. Un neutron lancé à la rencontre d'un noyau d'uranium le fractionne en deux parties, en dégageant une quantité considérable d'énergie.

La nouvelle fait l'effet d'un coup de tonnerre. Des dizaines d'articles sont publiés sur le sujet. On imagine les formidables débouchés de cette nouvelle forme d'énergie, pour peu que l'on soit capable d'en maîtriser la mise en œuvre.

Et voilà que resurgit la formule magique d'Albert EINSTEIN (laquelle remonte à 1905) :

$$E = Mc^2$$

E, l'énergie, est égale à M, la masse, multipliée par le carré de la vitesse de la lumière, c^2 .

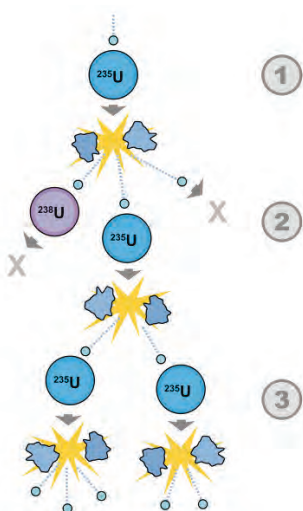
Je serais bien incapable de rendre compte de toute la portée scientifique de l'équation. Il suffit de retenir pour notre propos qu'une faible disparition de masse se transforme en une énorme quantité d'énergie. Or, la fission du noyau entraîne une perte de masse de 1 % environ et l'on calcule que 50 milligrammes d'uranium produisent autant d'énergie que 1 tonne de TNT.

Pourtant, EINSTEIN ne croyait guère à des applications possibles de la physique nucléaire, pour la bonne raison que le noyau occupe une place infime, dans le volume de l'atome (à titre de comparaison, un noyau de 2 m de diamètre s'inscrirait dans un atome de 100 km de rayon). Comment imaginer des installations industrielles capables de travailler avec ce degré de précision ? Et pourtant, son scepticisme n'aura pas le dernier mot.

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

Trois dernières découvertes viennent compléter la panoplie des « atomistes » :

- Celle de l'Italien Enrico FERMI, datée de 1934, constatant que les neutrons ralentis (par un trajet dans la paraffine par exemple) ont une efficacité beaucoup plus grande que les neutrons ordinaires. Résultat paradoxal qui s'explique par la physique quantique. Des matériaux ralentisseurs, « modérateurs », comme l'eau lourde, seront donc à prévoir dans les futures installations.
- Celle de Niels BOHR, en février 1939, qui met en évidence le fait que sur les deux isotopes contenus dans l'uranium naturel : U238 et U235, seul le second se prête à la fission (on dit qu'il est « fissile »). C'est malheureusement le plus rare (0,72 % de l'uranium) ; d'où l'intérêt d'augmenter cette proportion pour obtenir un combustible plus réactif par des procédés d'« enrichissement » de l'uranium que l'on retrouvera plus loin.
- Celle enfin, et la plus essentielle, de Frédéric JOLIOT, Francis PERRIN, Lew KOWARSKI et Hans HALBAN, les quatre « Mousquetaires » français, qui publient en avril 1939, très peu de temps avant leurs concurrents américains, un article dans la revue « NATURE » démontrant que la fission du noyau de l'uranium s'accompagne de l'émission de 3,5 neutrons (le chiffre exact sera de 2,4) qui peuvent à leur tour fragmenter d'autres noyaux et ainsi de suite, par un phénomène de « réaction en chaîne ».



Réactions en chaîne contrôlée dans les réacteurs nucléaires

Comme l'écrit Georges CHARPAK, dans son livre « de TCHERNOBYL en TCHERNOBYLS » : une réaction en chaîne « permet de passer de l'infiniment petit d'une réaction nucléaire indivi-

duelle à une réaction intéressant des millions de milliards de milliards de noyaux d'un objet à notre échelle ». Nous sommes bien passés de la science pure à l'application pratique. Il suffit pour s'en convaincre de noter que le mois suivant l'équipe française dépose trois brevets pour protéger la propriété de ses travaux.

Ces brevets couvrent deux domaines importants qui touchent à la réalisation :

- des réacteurs nucléaires électrogènes
- d'armes nucléaires

On peut regretter que la guerre nous ait privés des retombées économiques de ces brevets.

Tout a été trouvé et tout reste à faire.

La course à la réaction en chaîne est engagée.

LA MISE EN ŒUVRE

LE TEMPS DE LA GUERRE 1939 - 1945

L'été 1939 ! Le ciel de l'Europe est lourd de menaces de conflits. Les physiciens, habités par leur enthousiasme alors qu'ils se sentent si près du but, veulent croire encore que la science poursuivra sa route selon ses propres critères. La guerre va tout emporter dans une autre logique.

Le 2 août, A. EINSTEIN écrit au Président ROOSEVELT pour alerter son attention sur les efforts déployés par l'Allemagne pour la mise au point d'une arme nucléaire. Le 1er septembre, la guerre éclate (on frémit rétrospectivement à l'idée, qu'à quelques années près, les nazis auraient ouvert les hostilités en possession de la bombe !).

Les « quatre mousquetaires » et leurs associés se mettent pourtant à l'ouvrage. Il s'agit d'abord de rassembler les éléments indispensables à la réalisation d'une première installation expérimentale de réaction en chaîne, une « pile atomique » selon l'expression consacrée. L'uranium est trouvé auprès de l'Union Minière du Haut Katanga au Congo sous forme d'un prêt de 7 tonnes d'oxyde. Quant au modérateur, l'eau lourde en l'occurrence, production exclusive de la Sté Norsk Hydro en Norvège, il fait l'objet d'une âpre compétition entre l'Allemagne et la France qui finira par l'emporter de haute lutte en s'appropriant le stock existant de 167 litres. Cet épisode a été porté à l'écran dans le film « La bataille de l'eau lourde ».

L'avance allemande vient bousculer tous les plans. Le Ministre de l'armement, Raoul DAUTRY (que l'on retrouvera par la suite) demande à l'équipe française de se replier sur l'Angleterre, que HALBAN et KOWARSKI rejoignent le 18 juin 1940 avec le stock d'eau lourde. Joliot-Curie préfère tenter de

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

poursuivre ses recherches sur place ; il milita dans la résistance. Ainsi doit s'interrompre une entreprise que les Français avaient les meilleures chances de réussir les premiers.

Il revient maintenant à la Grande-Bretagne de prendre le relais pour une courte période cependant. Des Physiciens allemands réfugiés en Angleterre démontrent la possibilité de fabriquer une bombe avec 5 kg d'U235 et le Comité MAUD chargé des applications militaires de la fission évalué à trois ans le temps nécessaire pour y parvenir. La réalisation d'un tel projet s'avère impossible dans un pays exposé à des bombardements incessants et qui doit consacrer toute son énergie à résister à un éventuel débarquement.

L'initiative passe de l'autre côté de l'Atlantique. Aux États-Unis, les esprits étaient déjà préparés à cette éventualité. Dès octobre 1941, la fusion des recherches anglaises et américaines est proposée ; elle connaîtra des soubresauts, mais se maintiendra toujours. Le 7 décembre 1941, les Japonais attaquent Pearl Harbor précipitant les États-Unis dans la guerre. L'énorme machine américaine se met en route et va avancer à marche forcée. L'Europe reste présente à travers l'équipe anglaise transférée à Montréal, elle-même renforcée par les physiciens français passés en Angleterre, auxquels se sont joints des éléments de la France libre (Bertrand GOLDSCHMIDT, qui en faisait partie, a retracé cet épisode dans «*L'Aventure Atomique*»).

Le développement du programme américain, le «*MANHATTAN PROJECT*», dont Robert OPPEHEIMER prendra la direction scientifique, est jalonné de quelques dates clefs :

- Été 1942 : lancement d'études tous azimuts sur l'enrichissement de l'uranium.
- 2 décembre 1942 : divergence (c'est-à-dire démarrage de la réaction en chaîne) de la première pile atomique à Chicago, réalisation de Enrico FERMI. Il s'agit encore d'une installation expérimentale et quelque peu improvisée, quand on songe qu'elle fut construite sous les gradins d'un stade. Elle fonctionne à l'uranium naturel avec le graphite comme modérateur.
- Les années 1943 et 44 voient la création et le développement de 3 grands sites :
 - **OAK RIDGE**, dans le TENNESSEE, pour la production d'uranium enrichi, avec deux procédés différents de séparation des isotopes menés en parallèle : la méthode électromagnétique et la diffusion gazeuse.

- **HANFORD**, dans l'Etat de Washington, pour la production de plutonium, à partir des combustibles irradiés dans trois piles installées sur le site et traités dans une usine de retraitement qui en assure l'extraction.

- **LOS ALAMOS**, dans le Nouveau Mexique, pour la fabrication des armes et les essais nucléaires.

Début 1945, les premières livraisons de plutonium et d'uranium enrichi parviennent à Los Alamos.

Tout semble aller de soi. On imagine mal les problèmes techniques innombrables à surmonter dans un délai très court pour parvenir à ces résultats. Nous les retrouverons nous-mêmes lorsqu'il faudra passer à l'action à notre tour.

Et les Français dans tout cela ? Ils évoluent à Montréal dans une semi-clandestinité et sont tenus au secret le plus absolu sur leurs activités, y compris vis-à-vis de leur gouvernement, consigne que Jules GUERON enfreindra pour signaler au Général DE GAULLE, de passage à Ottawa en juillet 1944, les intenses préparatifs américains. Leur présence au Canada leur permettra de rester dans la course et d'acquérir une expérience qui se révélera précieuse par la suite.

On pense par exemple à la participation de L. KOWARSKI à la construction de la grande pile canadienne à eau lourde de CHALK RIVER dont il s'inspirera pour la réalisation de ZOE et aux travaux de B. GOLDSCHMIDT sur l'extraction du plutonium.

Vous connaissez la suite du programme américain :

- **16 juillet 1945** : première explosion nucléaire expérimentale à ALAMOGORDO
- **6 août 1945** : destruction d'HIROSHIMA par une bombe à l'uranium 235
- **8 août 1945** : destruction de NAGASAKI par une bombe au plutonium

Le bombardement de chacune de ces deux cités a fait environ 200 000 morts. L'aventure scientifique s'achève dans le drame. Oppenheimer lui-même dira : «*aujourd'hui le pêché est entré dans la Physique*». Comme cela avait d'ailleurs été le cas avec la découverte de NOBEL concernant les explosifs. On peut remarquer que les bombardements de DRESDE avec des bombes classiques ont fait autant de morts. La différence provient du nombre de vecteurs engagés, un bombardier dans un cas, plus de 2000 dans l'autre.

Quel chemin parcouru depuis les interrogations de BECQUEREL sur la fluorescence !

Quelle ambiguïté des entreprises humaines !

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

II - LA CREATION D'UNE ACTIVITE NUCLEAIRE EN FRANCE : 1945 – 1970

La période précédente s'est inscrite par la force des choses dans un contexte international. Notre propos s'attachera désormais plus particulièrement au nucléaire en France.

LES PREMIERS PAS : 1945 -1949

PARIS est libéré en août 1944. La FRANCE reprend peu à peu possession de son territoire. Dès le mois de décembre 1944, HALBAN fait un aller et retour Montréal - Paris pour prendre contact avec JOLIOT à propos des brevets français. Fin 1945, la guerre terminée, les «Canadiens» rentrent au bercail et l'équipe se reconstitue tout naturellement autour de Frédéric JOLIOT-CURIE, dont le prestige demeure incontesté (il a été nommé par ailleurs Directeur du CNRS).



L'équipe du début du CEA : Assis de gauche à droite : Pierre AUGER, Irène CURIE, Frédéric JOLIOT, Francis PERRIN, Lew KOWARSKI. Debout de gauche à droite : Bertrand GOLDSMIDT, Pierre BICQUARD, Léon DENIVELLE, Jean LANGEVIN

La France se dote d'un gouvernement provisoire présidé par le Général DE GAULLE. L'une des premières décisions prises par cette autorité est la création d'un organisme spécifique chargé de développer les applications de l'énergie atomique. Cela traduit bien pour l'époque l'enjeu stratégique du nucléaire et les potentialités qu'il laisse espérer dans le domaine de l'énergie. L'Ordonnance du 18 octobre 1945 instituant le COMMISSARIAT A L' ENERGIE ATOMIQUE en fait une structure très originale parmi les établissements publics français. D'un côté, «il est très proche du Gouvernement et pour ainsi dire mêlé à lui» (son Comité, équivalent

d'un Conseil d'Administration, est présidé par le Chef du Gouvernement lui-même). Mais il dispose en même temps «d'une grande liberté d'action» et «sa gestion est régie par le droit privé». Autre particularité : deux responsables se partagent la direction du CEA :

- Le Haut Commissaire pour les questions scientifiques et techniques.
- L'Administrateur Général, délégué du Gouvernement, pour les attributions d'ordre administratif et financier.

Les deux premiers titulaires ne nous sont pas inconnus, puisqu'il s'agit de Frédéric JOLIOT-CURIE en qualité de Haut Commissaire et de Raoul DAUTRY, l'ancien Ministre de l'Armement, pour le poste d'Administrateur Général. Ce sont, pourrait-on dire, des hommes du sérail. La route est libre pour reprendre l'entreprise interrompue.

Il faut trouver un Centre un peu isolé pour accueillir la première pile, ainsi que les laboratoires et ateliers associés. Ce sera le Fort de CHATILLON, situé sur la commune de FONTENAY AUX ROSES. On y voyait se dérouler les exécutions capitales. Il est affecté au CEA le 8 mars 1946.

On a besoin également d'assurer la Purification des concentrés de minerai d'uranium qui viennent d'Afrique. Le CEA s'installe à la même époque dans une enclave de la Poudrerie du BOUCHET, à proximité de Corbeil, pour effectuer les opérations de raffinage.

Plus généralement, c'est tout le problème de l'approvisionnement en matières premières nucléaires qu'il convient de résoudre pour assurer l'indépendance énergétique du Pays. Des missions de prospection d'uranium sont lancées sur tout le territoire, qui s'annoncent déjà prometteuses dans le LIMOUSIN. Les perspectives sont considérables. Il faut penser plus large et plus loin. Les installations nucléaires, vastes et sensibles et tous les équipements annexes, demanderont beaucoup d'espace. On achète en 1947 un grand terrain de 271 hectares sur le Plateau de SACLAY qu'avait parcouru jadis Charles PEGUY. Par ses dimensions et sa conception d'ensemble, il reste aujourd'hui encore la vitrine du CEA.

Pendant ce temps, l'équipe scientifique s'affaire autour de la réalisation de la Pile, sous l'impulsion de L. KOWARSKI fort de son expérience canadienne. La tâche est loin d'être aisée et il faut imaginer la France de cette époque, encore en pleine période de pénurie. Les anciens aimaient nous raconter ces moments difficiles où il fallait faire preuve de beaucoup d'imagination pour travailler avec des «bouts de ficelle». Enfin, arrive l'heure tant attendue : le 15 décembre 1948 à 12 h12, la Pile ZOE diverge.

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

ZOE, quel joli nom ! Qui cache une explication scientifique : Z comme zéro énergie, O comme oxyde d'uranium, E comme eau lourde.



Pile Zoé

L'évènement connaît un retentissement considérable et apparaît, dans cet après-guerre encore difficile, comme un des signes du rétablissement du pays. Nous n'avons pas perdu la main. En 3 ans, la France s'est remise au niveau des pays dont le sol a été épargné par la guerre.

Dernier coup d'éclat dans cette période fertile en évènements : le 20 novembre 1949, les quatre premiers milligrammes de Plutonium sont isolés au BOUCHET. Cela signifie que l'on est déjà capable de traiter des combustibles irradiés, retirés de la Pile ZOE et que l'on dispose d'un procédé pour extraire le plutonium. Pour fêter ce succès, obtenu un dimanche, tous les artisans de l'opération se retrouvent dans la propriété des JOLIOT. Ceci pour illustrer le climat de l'époque.

Voilà une entrée en matière qui ne manque pas de panache. Elle augure bien des développements à venir.

LA MISE PLACE : 1950 – 1958

L'euphorie de l'après-guerre s'est vite dissipée. La « guerre froide » entre l'Est et l'Ouest (1948 - blocus de Berlin - Coup de Prague) fait resurgir le spectre d'un conflit mondial avec l'arme atomique à la clef. L'Europe Occidentale paraît fragile et désarmée devant la menace soviétique. L'Amérique est bien lointaine et des voix s'élèvent pour réclamer un armement nucléaire autonome.

Sur le plan interne, la France renoue avec l'instabilité gouvernementale et le flottement des politiques. Les points de vue sont divergents quant à l'utilisation de l'énergie atomique.

C'est dans ce contexte que se situe le CEA au moment où il lui revient d'asseoir les fondations de l'activité nucléaire.

La position de JOLIOT-CURIE est délicate. C'est un homme de conviction. Membre du Parti Communiste (alors très lié à l'URSS) et pacifiste résolu, il lance en avril 1949 l'Appel de STOCKLOHM sur l'interdiction absolue de l'arme atomique. Ses prises de position, aussi légitimes soient-elles, apparaissent peu compatibles avec ses responsabilités dans un climat de tension internationale. Georges BIDAULT se résout à l'écarter en avril 1950. Il retourne à son labo du Collège de France et continuera d'exercer une forte influence scientifique, notamment avec la création du Labo de Physique Nucléaire d'Orsay. Irène meurt en mars 1956 d'une leucémie. Frédéric, déjà malade, la rejoint en janvier 1958.



Pierre GUILLAUMAT

Une nouvelle équipe dirigeante est nommée à la tête du CEA. Francis PERRIN prend le poste de Haut Commissaire et Pierre GUILLAUMAT celui d'Administrateur Général (en remplacement de Raoul DAUTRY décédé en 1951). Le premier est bien connu du milieu nucléaire. Le second vient des pétroles. Polytechnicien (Corps des Mines), c'est le type du grand commis de l'État qui va

imprimer le CEA de sa forte personnalité.

La tâche est considérable. Il faut tout à la fois :

- créer et équiper des centres d'études pour développer les recherches indispensables aux réalisations nucléaires
- construire et faire fonctionner des réacteurs capables de produire de l'électricité
- ne pas perdre de vue les applications militaires.

Ce dernier point est le plus délicat. L'hypothèse de la possession de l'arme nucléaire a été implicitement retenue par les responsables, mais on usera d'une certaine ambiguïté dans la présentation des projets pour se frayer un chemin à travers des majorités politiques opposées :

a) Du côté des CENTRES D'ETUDES NUCLEAIRES, la nouvelle période voit surtout le développement de Saclay. La construction des bâtiments débute en 1949 selon les plans de l'architecte Auguste PERRET qui donnent une grande homogénéité d'ensemble. En 1952, un accélérateur de particules est mis en service et la seconde pile à eau lourde (EL2) diverge (elle est destinée aux expériences de physique et de métallurgie ainsi qu'à la production des radioéléments artificiels), suivie en 1957 de la pile EL3 pour les études de comportement des matériaux de structure. Il faut bien voir que la

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1945 à nos jours

science toute nouvelle du nucléaire ne peut progresser sans des recherches tous azimuts : depuis les « mécanismes » neutroniques eux-mêmes, le comportement des combustibles, les dispositifs de sécurité jusqu'à la tenue des matériaux entourant le cœur du réacteur, tout est soumis à des flux intenses de rayonnements et à des températures élevées.



La province n'est pas oubliée, avec ses ressources scientifiques. La création d'un nouveau Centre est décidée à GRENOBLE, dédié plus particulièrement à la physique et à la recherche fondamentale. Il se veut ouvert sur l'université et l'industrie. La première pierre est posée en 1956. Le Professeur Louis NEEL, futur Prix Nobel de Physique, en prend la direction.

b) En matière de Production d'électricité nucléaire, le premier plan quinquennal de l'énergie atomique de juillet 1952 prévoit la construction de deux réacteurs, complétés plus tard par un troisième.

Faute de disposer d'installations d'enrichissement de l'uranium, la France est conduite à choisir la « filière » UNGG. Il s'agit d'un type de réacteurs utilisant l'uranium naturel comme combustible, le graphite comme modérateur de neutrons et le gaz carbonique pour le transport de la chaleur vers les turbines et pour le refroidissement du cœur.

Un site particulier est retenu pour accueillir ce programme, celui du MARCOULE (72 ha) près d'Avignon. Le premier réacteur (G1) diverge en septembre 1953. C'est encore un équipement prototype de puissance limitée (40 MW). Les 2 autres G2 en 1958 et G3 en 1959 sont plus opérationnels et vont constituer la tête de série de la filière. Ces « cathédrales » nucléaires, hautes de 50 m, ne passent pas inaperçues dans le paysage du Gard.

MARCOULE abrite également une usine de retraitement des combustibles irradiés des trois piles du Centre, mise en service en 1958. Elle permet d'extraire le plutonium utilisé dans la fabrication des armes atomiques. C'est ainsi qu'apparaissent l'ambivalence du programme électronucléaire français et sa finalité également militaire. MARCOULE, avec ses trois réacteurs et son usine plutonium ressemble étrangement au site de Hanford créé en 1943 aux USA dans le cadre du projet Manhattan.



Des ressources plus abondantes en matières premières s'avèrent nécessaires pour alimenter ce premier parc de réacteurs. De nouvelles mines d'uranium sont ouvertes en VENDEE et au FOREZ en plus du LIMOUSIN en pleine exploitation. Fin 1956, la production de minerai s'élève à 175 t en uranium contenu. L'usine de raffinage du BOUCHET est entièrement réaménagée pour passer au stade industriel.



c) Les applications militaires se veulent discrètes au départ pour ne pas heurter des sensibilités opposées. Peu à peu, l'idée fait son chemin. Pierre MENDES-FRANCE, en particulier, a tiré les leçons des conférences internationales où il constatait que seuls les pays qui possédaient l'arme atomique étaient écoutés. Il demande en 1954 de lancer des études en vue de la fabrication d'une bombe et d'un sous-marin nucléaires.

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

Un «Bureau d'Études Générales » est aussitôt créé au CEA pour se charger du problème. Son appellation vague illustre bien la volonté de ne pas éveiller l'attention.

Des pas plus concrets sont accomplis :

- Le Fort de VAUJOURS est rattaché au CEA le 3 juin 1955 pour y poursuivre des études de détonique.
- Plus important encore, on décide l'implantation d'un grand centre, sorte de Saclay militaire, à BRUYERES LE CHATEL près d'Arpajon le 8 juillet 1955, sur un site où travaillait le Professeur Yves ROCARD (dont vous connaissez mieux le fils Michel).
- Un Centre est créé en 1957 à VALDUC près de Dijon pour les études de neutronique et de criticité ; un autre à MORONVILLIERS dans la région de Reims en septembre de la même année pour les «essais froids».

Tout un dispositif se met en place, soigneusement protégé par le Secret Défense. On nous recommandait la plus grande discrétion sur l'existence de ces activités et de ces sites dont nous ne connaissions aucun détail.

Une étape décisive est franchie en mars 1958, lorsque Félix GAILLARD demande de préparer une première série d'explosions nucléaires, position que DE GAULLE reprendra ensuite à son compte.

Ainsi, en quelques huit années, les bases indispensables à l'essor du programme nucléaire français ont été jetées. Je garde de cette époque (au cours de laquelle le CEA m'a recruté) le souvenir d'une période privilégiée, aux «mille chemins ouverts» dans l'éclosion des initiatives et des projets. La jeunesse du personnel ajoutait une note d'allant et de spontanéité et les moyens n'étaient pas trop comptés dès lors que l'objectif en valait la peine.

LE DEPLOIEMENT DU PROGRAMME NUCLEAIRE : 1958 - 1970

Le «retour aux affaires» du Général DE GAULLE en juin 1958 donne une impulsion nouvelle au nucléaire, auquel il a toujours prêté une grande attention. Il coïncide avec le moment où les investissements en équipements et en recherches commencent à porter leurs fruits.

Trois événements importants marquent cette période :

- la maîtrise de l'arme atomique ...
- la construction de l'usine d'enrichissement d'uranium de PIERRELATTE

- le début du programme électronucléaire EDF ; Sans oublier les activités de recherche et développement.

a) Le Général «veut la bombe» et toutes les pressions internationales n'entameront pas sa détermination. Les recherches militaires, qui avançaient à pas feutrés, deviennent une «ambition nationale», clairement affichée. Il confirme la décision de Félix GAILLARD et fixe au premier trimestre 1960 la date de la première explosion. Il ne cache pas son impatience et demande régulièrement «*qu'est ce qu'ils font là-bas ?*» désignant ainsi les équipes qui s'activent sur le site de REGGANE, en ALGERIE, à plus de 700 km au sud de COLOMB BECHAR. Ils font de leur mieux et la première bombe atomique française, baptisée «Gerboise bleue» explose le 13 février 1960.

L'évènement a une portée considérable, tout à fait comparable pour les applications militaires à celles de ZOE dans le domaine des réacteurs. La France a démontré sa capacité à maîtriser la fabrication d'une arme nucléaire. Elle devient le quatrième pays à posséder la bombe

Il s'agit encore d'un engin expérimental placé en haut d'un pylône. Le Professeur ROCARD (toujours lui !) fera une première approximation de sa puissance en observant l'explosion à travers un trou percé dans une boîte d'allumettes ! Trois autres essais «en aérien» prendront la suite jusqu'en avril 1961.

Ces premiers succès permettent de bâtir un véritable programme d'armement nucléaire, objet de la loi du 8 décembre 1960, qui chargera le CEA de la réalisation des armes (et non des vecteurs) et des moteurs de sous-marins à propulsion nucléaire.

Pour compléter le dispositif de recherche et de fabrication, deux grands centres sont créés en province : celui du RIPAUT près de Tours en 1962 et celui du CESTA à proximité de Bordeaux en 1965. Le Fort de LIMEIL en région parisienne, déjà utilisé, est officiellement rattaché au CEA en 1959.

Le polygone d'expérimentation se déplace. Le site de REGGANE est abandonné dans un contexte international hostile aux expérimentations à l'air libre, dans un pays devenu indépendant. Des essais sont repris, cette fois en souterrain dans le Massif du HOGGAR à IN ECKER. Treize tirs y seront effectués de 1961 à 1966, époque à laquelle les Accords d'EVIAN mettront fin à la présence des troupes françaises en ALGERIE.

Dès 1962, le CEA prépare un grand centre d'expérimentation au Pacifique, en Polynésie, qui se développe autour des bases arrières de TAHITI et HAO et de deux sites d'essais sur les atolls de MURUROA et FANGATAUFA.

Le premier tir, de juillet 1966, est effectué sur barge ainsi que

ASSOCIATION DES RETRAITÉS DU CEA

SECTION LOCALE BIII / ESSAIS / IDF

L'ECHO DU GRAND RUÉ

ARCEA – Ile de France
BRUYÈRES LE CHÂTEL – 91297 ARPAJON Cedex
Tél. : 01 69 26 41 98 - 41 99 - 51 73 - 61 80
Fax : 01 69 26 71 34

Courriel : bureau@arcea-dif.fr
<http://arcea-dif.fr>

Décembre 2010

N° 133

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours



Essai nucléaire aérien

L'appelle aussi « bombe H » du fait de la mise en jeu d'hydrogène. La France accède ainsi à la panoplie complète des armes nucléaires.

Quant aux moteurs de sous-marins, des études sur un réacteur spécifique ont été lancées dès 1959. Un prototype est construit sur le centre de CADARACHE avec de l'uranium enrichi prêté par les Américains (qui ne nous croyaient pas capables de l'utiliser à bonne fin). Surprise, il diverge en 1964 et ses performances se révèlent suffisamment concluantes pour engager la réalisation d'un premier sous-marin lanceur d'engins qui sera lancé en 1967. Il s'agit du « Redoutable ». Le « Terrible » vient l'accompagner en 1969.

Au total, les vœux du Général ont été exaucés.

b) L'uranium enrichi est une matière de base nucléaire dont on peut difficilement se passer. N. BOHR nous a appris que dans l'uranium naturel seul l' U^{235} est fissile (l' U^{238} ne le devient qu'en se transformant en plutonium au cours d'un passage en pile). Plus la teneur en U^{235} est élevée et plus le combustible est réactif, ce qui présente de grands avantages pour la souplesse et le rendement des réacteurs, pour l'efficacité des armes et pour la compacité des moteurs de sous-marins.

Mais comment « enrichir » l'uranium ? Les Américains ont imaginé pendant la guerre trois méthodes. Les Français retiennent celle de la diffusion gazeuse.

Le procédé joue sur la différence de masse atomique entre l' U^{235} et l' U^{238} . On peut penser qu'en forçant un gaz (l'hexafluorure d'uranium) à passer à travers une paroi microporeuse, l'élément le plus léger (l' U^{235}) franchira plus facilement la barrière et se retrouvera en proportion plus importante à la sortie. Évidemment, la différence est infime et

il faut de très nombreux passages pour obtenir un enrichissement significatif, ce qui implique des installations de grandes dimensions.



Pierrelatte

Les études engagées dès 1956 débouchent l'année suivante sur un mode opératoire. Reste à passer au stade industriel. La décision est prise en 1958 de construire une usine d'enrichissement d'uranium à PIERRELATTE. Les perspectives d'applications militaires n'y sont sans doute pas étrangères. S'ouvre alors un immense chantier, le plus important d'Europe, couvrant 200 hectares de terrassement et 220000 m² de surface à bâtir. Le complexe industriel comprend :

- L'usine basse produisant un U enrichi à 2%
- L'usine moyenne à 6 %
- L'usine haute à 25 %
- Et l'usine très haute à 90 %.

Les mises en service vont s'échelonner de 1964 à 1967. Le prix à payer est certes lourd, mais la maîtrise de cette précieuse matière première ouvre la voie à tous les développements de l'industrie nucléaire.



Centrale nucléaire de Chinon

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

c) La «démonstration» des trois réacteurs UNGG de MARCOULE rend possible le passage du témoin du CEA à l'entreprise publique chargée de la production d'électricité : EDF. Le programme électronucléaire se poursuit dans le cadre de la «filrière française». De 1966 à 1971, six réacteurs EDF sont mis en service : trois sur le site de CHINON, deux à ST LAURENT LES EAUX, un à BUGEY. La puissance par unité se renforce sensiblement : de 60 jusqu'à 540 MW. En fin de période, le nucléaire fournit 5 % de l'électricité produite en FRANCE. Résultat encore modeste, mais déjà significatif.

Le CEA de son côté explore de nouveaux modèles :

- D'abord et assez logiquement les réacteurs «à neutrons rapides». Enrico FERMI nous avait pourtant démontré en 1934 que les neutrons ralentis étaient plus efficaces et voilà qu'on veut les accélérer ! En fait, cette exigence de «modération» peut être dépassée avec un combustible plus réactif à 10 ou 12 % de plutonium. Mais c'est par rapport au cycle du combustible que ce type de réacteur présente le plus d'avantages en permettant d'utiliser le plutonium produit par les centrales UNGG et en produisant plus de plutonium qu'il n'en consomme en raison de sa plus forte aptitude à transformer l'U238 en plutonium (d'où le nom de surgénérateur qu'on lui donne aussi).

Un premier réacteur expérimental à neutrons rapides refroidi au sodium liquide, baptisé RAPSODIE, diverge à CADARACHE en janvier 1967.

- Une autre voie est étudiée dans le prolongement de la première Pile ZOE (uranium naturel et eau lourde) pour l'amener à la production d'électricité. Le réacteur EL4 est mis en service en 1966 à BRENNILIS dans les MONTS d'ARREE (il sera arrêté en 1985 faute d'une rentabilité suffisante).
- Enfin, on notera l'entrée discrète de la « filière américaine » - uranium enrichi et eau sous pression - mise au point par WESTINGHOUSE en 1957. EDF en association avec un consortium Belge fait construire une centrale de ce type à CHOOZ dans les Ardennes. On aura l'occasion d'en reparler.

Bien évidemment le «cycle du combustible» (c'est-à-dire l'ensemble des opérations concernant les matières premières nucléaires depuis le minerai jusqu'au retraitement) suit une évolution parallèle à la montée en puissance de l'électronucléaire.

- La production de minerai diversifie ses ressources en allant au-delà des mers exploiter des gisements au NIGER et au GABON (c'est dans ce dernier pays que l'on découvre en 1972 un «réacteur fossile». Imaginez qu'il y a 9 milliards

d'années, une réaction en chaîne s'est déclenchée sous le seul effet de facteurs naturels). Trois usines assurent en métropole la concentration du minerai.

- Une deuxième usine de raffinage est implantée à MALVESI près de Narbonne.
- On vient de parler de l'investissement réalisé à PIERRELATTE pour l'Uranium enrichi.
- En matière de retraitement, l'usine de MARCOULE est saturée avec les combustibles irradiés des trois réacteurs du site. Décision est prise en 1960 d'ouvrir une seconde installation à LA HAGUE pour les besoins des réacteurs EDF. L'atelier UP2 démarre en 1966.

d) Pour soutenir ces programmes exigeants, il a fallu renforcer et diversifier le potentiel de recherche fondamentale et appliquée.

Un dernier Centre d'Études Nucléaires est créé en 1960 sur un vaste domaine, le site de CADARACHE près de Manosque occupé jusque-là par l'École des Gardes Forestiers (les animaux de la forêt, devenus prisonniers dans l'enceinte de l'établissement, se sont fait une raison, si bien que l'on voit des sangliers venir mendier du pain sous les fenêtres des cantines). Avec quatre Centres d'Études, deux en province et deux en région parisienne, le CEA dispose d'une capacité d'accueil suffisante pour les équipements très particuliers utilisés dans la recherche atomique.



Usine de retraitement de La Hague

Il y a d'abord les réacteurs expérimentaux dont la finalité est très différente de celle des réacteurs de puissance sur lesquels les essais sont peu recommandés. Ce sont des installations plus souples et plus accessibles (souvent de type piscines) dont la configuration est adaptée dans chaque cas aux objectifs recherchés : cela va de la neutronique à la recherche fondamentale en passant par le comportement des combustibles,

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

les études de sûreté, la production de radio éléments, etc...). Neuf réacteurs expérimentaux ont été mis en service pendant cette période, soit en moyenne deux par Centre. Leurs noms nous transportent dans la mythologie : MINERVE, OSIRIS, PEGASE, SILOË ...

Viennent ensuite les «labos chauds», ainsi nommés, non pour la qualité de leur climatisation en hiver, mais pour leur affectation à l'examen des combustibles ou matériaux irradiés (appelés «chauds» dans le jargon atomique). On y travaille derrière d'épaisses parois de béton percées de hublots de verre au plomb, en utilisant des télémanipulateurs pour saisir les objets, ce qui demande une grande dextérité.

La Recherche Fondamentale a ses propres installations et notamment les accélérateurs de particules qui utilisent le bombardement de cibles par des projectiles lancés à des vitesses réellement «astronomiques», pour étudier la structure de la matière. Ils peuvent être linéaires ou circulaires (des sortes de «vélo-dromes à particules») comme le synchrotron SATURNE, mis en service à Saclay en 1958.



Quant aux recherches elles-mêmes, indépendamment des domaines déjà évoqués à propos des équipements, il est des disciplines plus classiques : électronique, informatique, robotique, simulation sans oublier la biologie, qui ont dû être portées à un niveau plus avancé pour répondre aux contraintes du nucléaire. Les progrès enregistrés ouvrent des débouchés inattendus sur l'extérieur aux équipes du CEA. L'exemple le plus célèbre est celui du Laboratoire d'Électronique et de la Technologie de l'Informatique, LETI, créé en 1968 et dont on parle beaucoup aujourd'hui dans le cadre des recherches sur les nanotechnologies. On peut citer également le service hospitalier Frédéric JOLIOT à ORSAY dans le domaine du diagnostic et de la thérapeutique à partir des radioéléments. Même en physique fondamentale, la découverte de la résonance magnétique nucléaire par Anatole ABRAGAM a débouché, par exemple, sur l'IRM.

L'avenir n'a pas été oublié avec la création dès 1956 de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires, en collaboration avec l'Éducation Nationale, pour la formation des ingénieurs et techniciens.

Après 25 ans de recherches et de travaux dans tous les domaines de la science atomique, les grands défis ont été relevés.

Il convient de rendre hommage à ceux qui, à tous les niveaux, se sont dépensés, dans des conditions souvent difficiles, sans pouvoir s'appuyer sur des précédents, pour mener à bien cette immense entreprise (qui comptait plus de 30 000 personnes en 1970 pour le seul CEA).

Le nucléaire a acquis le droit de cité. Il sort de la «légende» pour entrer dans la vie quotidienne. Son histoire n'est pas achevée pour autant et ne sera pas exempte de rebondissements.

III - LA PERIODE CONTEMPORAINE ET LES QUESTIONS D'AUJOURD'HUI

Plutôt que de suivre la chronologie des événements, on s'attachera dans cette dernière partie à mettre en évidence les faits importants survenus depuis 1970 dont les conséquences continuent de retentir de nos jours.

LE TOURNANT INDUSTRIEL

Au cours des années 1970, trois événements vont profondément bouleverser les activités et les structures de l'industrie nucléaire et lui donner une autre dimension :

- L'adoption de la «filière américaine»
- Le choc pétrolier et la brusque accélération du programme électronucléaire
- La création de la COGEMA à laquelle est confié le cycle du combustible.

a) A la charnière des années 1960/1970, un grand débat oppose le CEA à EDF sur le choix du type de réacteur électrogène. Le premier tient à la «filière française», uranium naturel graphite gaz, dont il possède tous les brevets, gage d'indépendance nationale. EDF tourne ses regards vers la «filière américaine», uranium enrichi et eau sous pression (REP), plus compacte et plus rentable. Entre les «frères ennemis», les bons mots sont parfois assassins. C'est ainsi que le Directeur d'EDF dira un jour : «le CEA vise le prix NOBEL et EDF celui du kWh». Après bien des atermoiements, la décision est prise en novembre 1969 par Georges POMPIDOU d'abandonner les UNGG pour passer aux REP.

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

Cela signifie également qu'EDF s'affranchit de la tutelle du CEA, qui n'est plus désormais le seul acteur nucléaire.

b) Le premier programme REP reste encore limité avec la mise en chantier de deux réacteurs par an, mais les évènements internationaux - et notamment la guerre entre ISRAËL et les PAYS ARABES - vont précipiter les choses. En octobre 1973, le prix du pétrole double deux fois, mettant brutalement en évidence la dépendance énergétique des pays occidentaux. Devant cette menace, la France adopte un remède radical. Pierre MESSMER annonce en 1974 le lancement de treize centrales de 1 000 MW en deux ans.

Comme l'écrit Jean-François MOUDOT dans Science & Vie :
« *il ne s'agit plus de préparer la relève du pétrole, mais de
s'en passer au plus vite* ».

Le passage au «tout nucléaire» pour la production d'électricité portera au total sur 58 réacteurs REP, répartis dans tout le pays, dont les mises en service s'échelonnent sur 20 ans de 1979 à 1999 (la puissance des dernières unités atteignant 1450 MW). Aujourd'hui, 75 % de l'électricité produite est d'origine nucléaire. Cet effort sans équivalent dans le monde permet à la France d'être moins exposée aux fluctuations du prix des carburants et nous assure un prix du KWh très inférieur à celui de nos voisins.

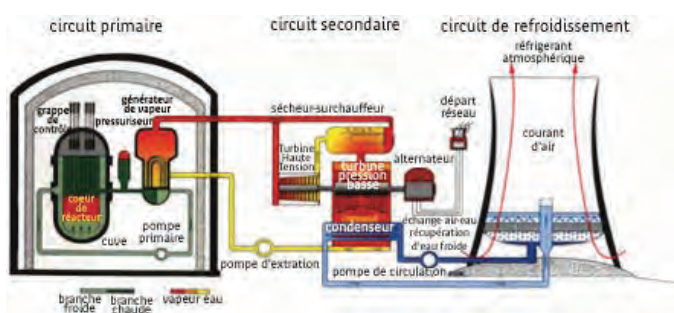


Schéma de principe d'un réacteur à eau sous pression

La filière «neutrons rapides» n'est pas négligée pour autant. Dans la prolongement de la pile expérimentale RAPSODIE, un premier réacteur prototype est mis en service à MARCOULE en 1973, baptisé PHENIX. L'étape industrielle est franchie avec la réalisation d'un grand réacteur de 1 200 MW, SUPER-PHÉNIX à CREYS-MALVILLE par un consortium européen animé par EDF. La mise en service intervient en 1985.

Après un premier incident en 1987, un second en 1997 le condamne à l'arrêt définitif devant l'hostilité de la sensibilité écologique. PHENIX, plus ancien est lui aussi à l'arrêt depuis septembre 2009.

c) Le changement d'échelle du programme électronucléaire ne peut manquer de retentir sur la production des matières premières. Pour alimenter des dizaines de réacteurs à U enrichi, l'usine de PIERELATTE devient tout à fait insuffisante. Une société européenne EURODIF est créée en 1973 à l'initiative de la France pour construire une usine d'enrichissement d'uranium répondant aux besoins du continent. L'Italie, l'Espagne et la Belgique y participent, mais également l'Iran. Le chantier débute aussitôt et les premiers éléments commencent à fonctionner en 1978. Georges BESSE, futur patron de RENAULT (assassiné en novembre 1986 par «Action Directe»), sera le principal artisan de cette grande réalisation. Elle permettait à l'époque de répondre au quart des besoins mondiaux en U enrichi.



Réacteur Phénix a Marcoule

Au-delà de l'enrichissement, il est évident que c'est tout le cycle du combustible qui doit passer au stade industriel. La décision est prise sous l'impulsion d'André GIRAUD en 1976 de créer une entreprise publique, la Compagnie Générale des Matières Nucléaires (COGEMA) pour reprendre l'ensemble des moyens et des effectifs du CEA affectés à ce secteur, depuis les mines jusqu'au retraitement. Transfert délicat, au cours duquel 6 000 personnes vont changer de statut, mais on prendra les délais et précautions nécessaires pour faire en sorte que l'opération s'effectue dans un climat relativement apaisé.



André Giraud

Les nouveaux responsables de la COGEMA, à la tête desquels on retrouve G. BESSE, ont à revoir tout le dispositif dans le sens du renforcement, notamment en matière de retraitement. Une seconde usine est prévue à LA HAGUE qui démarrera en 1990, suivie du doublement de la première installation en 1994, portant la capacité totale de retraitement du site à 1 600 t/an, ce qui permet d'accueillir une clientèle étrangère.

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

d) Que devient le CEA au milieu de tous ces changements ? Qu'il s'agisse du choix des réacteurs REP ou de la création d'EURODIF et de la COGEMA, toutes ces évolutions sont ressenties par le personnel comme autant d'amputations. Homme-orchestre du nucléaire, le CEA est réduit au rôle de partenaire des industriels (sauf pour les applications militaires, où il reste l'acteur principal). Le traumatisme est réel dans les esprits et les années passées prennent avec le recul le goût du «paradis perdu». Il faudra l'autorité d'André GIRAUD, nommé Administrateur Général en 1970 (il deviendra plus tard Ministre de l'Industrie, puis de la Défense), pour maintenir l'influence du CEA à l'extérieur et redonner aux équipes confiance en l'avenir.



En fait, les activités restent soutenues. On peut les regrouper schématiquement autour de cinq objectifs :

- Le soutien aux industriels : si les nouvelles sociétés nucléaires ont acquis la pleine maîtrise de leur domaine, elles ont toujours besoin des moyens d'expérimentation et des compétences du CEA pour les essais et pour l'analyse et l'interprétation des incidents. Les piles expérimentales en particulier sont indispensables.
- L'exploration des solutions d'avenir : que ce soit les réacteurs du futur, la fusion contrôlée ou la gestion des déchets, tous ces domaines exigent un long cheminement de recherche et des investissements conséquents qui ne sont pas de la responsabilité des producteurs d'électricité. On en reparlera dans la dernière partie.
- La recherche fondamentale : elle constitue le terreau de la recherche appliquée et l'on doit lui conserver toute sa rigueur. Elle a d'ailleurs beaucoup progressé. L'image de l'atome que nous avons laissée en 1940 s'est compliquée avec la découverte d'éléments plus infimes : les quarks et les bosons. Des passerelles ont été lancées avec l'astrophysique pour comprendre l'élaboration progressive de la matière. Deux nouvelles piles ont été mises à la disposition des Physiciens : le réacteur à haut flux de Grenoble en

1971 en collaboration avec les Allemands, la pile Orphée à Saclay en 1980. Des collaborations tous azimuts sont nouées, soit au plan national par le Grand Accélérateur National à Ions Lourds avec le CNRS à Caen en 1982, soit au plan international pour la réalisation au CERN de Genève en 1989 du LEP, grand anneau de collision de 27 km de circonférence.

- La mise en valeur des techniques utilisées dans le nucléaire : le degré de performance atteint dans certaines disciplines pour répondre aux exigences de l'activité atomique intéresse aussi d'autres industries. Des foyers de compétence se sont ainsi ouverts sur l'extérieur et ont trouvé l'opportunité d'un nouveau développement. On a déjà parlé du LETI de Grenoble qui est passé des circuits intégrés aux écrans plats pour devenir aujourd'hui un acteur important dans les nanotechnologies. On peut citer aussi la télémanipulation et la robotique (notamment pour les handicapés), les piles à combustible issues des recherches sur les matériaux, les études sur le climat dans le prolongement de la science isotopique, les recherches sur la maladie du prion à partir de la biologie nucléaire, sans oublier les énormes capacités de calcul et de simulation nécessaires aux besoins du CEA et mises à la disposition de clients extérieurs.

André GIRAUD, arrivé avec un certain scepticisme sur les capacités des équipes CEA, reconnaissait quelques années plus tard leur aptitude particulière à rassembler rapidement, du fait d'un long compagnonnage, des compétences très différentes pour résoudre un problème scientifique complexe.

- Les applications militaires : le CEA continue d'en partager la responsabilité avec les Armées, mais son mode d'intervention va considérablement évoluer.

Une première phase de 1970 à 1992 s'inscrit dans la continuité des programmes précédents. Les campagnes de tirs se succèdent au Pacifique, d'abord en aérien, puis à partir de 1975 en souterrain en bordure d'atoll, enfin en zone centrale de lagon à partir de 1981 pour éviter le risque d'effritement des massifs coralliens. Côté sous-marins, un nouveau réacteur de type très compact est mis au point en 1975 qui sera amélioré en 1989. De 1971 à 1989, six sous-marins nucléaires lanceurs d'engins et six sous-marins d'attaque seront mis en service.

L'année 1992 marque une rupture, avec en avril l'annonce d'un moratoire sur les essais nucléaires, suivi en mai de l'adhésion de la France au Traité de non Prolifération. Une ultime campagne de six tirs sera organisée de septembre 1995 à janvier 1996 à la demande de Jacques Chirac pour bien repérer les données de base indispensables à la simulation. Une nouvelle période s'ouvre en effet :

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

Le centre d'expérimentation du Pacifique ferme ses portes après le démantèlement de ses installations en 1998.

Le maintien de la dissuasion nucléaire repose désormais sur la simulation de la fusion par faisceaux laser, dont il sera question au dernier chapitre.

Comme s'il ne suffisait pas en cette fin de siècle que le nucléaire soit transformé par l'évolution des programmes et des structures, son image dans l'opinion va se trouver elle-même affectée par l'accident de TCHERNOBYL.

TCHERNOBYL ET SES CONSEQUENCES

Le 26 avril 1986 un réacteur russe explose en Ukraine à TCHERNOBYL causant des dommages humains et matériels incalculables. Que s'est-il passé ? Comment en est-on arrivé là ?

Les faits : l'accident est intervenu au cours d'un essai de sûreté dont on ne peut contester le bien-fondé. Il s'agissait de vérifier si, aussitôt après la mise à l'arrêt du réacteur, la puissance résiduelle était suffisante pour faire fonctionner les pompes de refroidissement jusqu'au moment où les diesels prennent le relais.

Quatre éléments négatifs se sont conjugués pour aboutir à la catastrophe : les deux premiers tiennent à la conception même des réacteurs russes :

- Les réacteurs MBMK ont une montée en puissance très rapide, qui laisse fort peu de temps pour réagir.
- Ils ne possèdent pas d'enceinte de confinement pour retenir les produits radioactifs en cas de fusion du cœur (un accident du même type s'est produit en 1979 aux USA, à THREE MILE ISLAND sans provoquer de relâchements significatifs dans l'atmosphère grâce à la barrière de l'enceinte).

Les deux autres causes sont liées au facteur humain :

- Un manque de formation du personnel d'essai, qui semble avoir estimé que toute précaution de sûreté devenait inutile à partir du moment où la mise à l'arrêt du réacteur avait été enclenchée.
- Un défaut de coordination entre les expérimentateurs et les agents de conduite du réacteur, responsables de l'installation, qui auraient dû suivre toutes les opérations.

L'enchaînement des faits peut se décrire ainsi : l'équipe d'essai met les dispositifs de sécurité hors circuit et commence les manœuvres pour obtenir le meilleur rendement de la puissance

résiduelle. Il en résulte aussitôt une augmentation très rapide et très forte de la réaction en chaîne et de la température qui entraîne la fusion des tubes de combustible. Les gaz accumulés provoquent une première explosion soulevant le couvercle du cœur de 1000 tonnes qui retombe et achève de ruiner l'installation. Une seconde explosion détruit le bâtiment de type industriel, laissant à l'air libre les débris du cœur et des 150 tonnes de combustible dont le quart va se disperser dans l'atmosphère.

Les effets immédiats sont dramatiques pour les premiers intervenants (opérateurs, pompiers, pilotes d'hélicoptère) qui essaient de limiter le sinistre, sans toujours être conscients du risque mortel auquel ils s'exposent : 28 personnes ont péri de cette manière.

Viennent ensuite les 860000 «liquidateurs», dont le nombre surprenant s'explique par l'ampleur de la tâche et surtout par la nécessité de les relever (en principe) lorsqu'ils ont atteint la dose de radiations admissible. Au-delà ce sont toutes les populations des régions environnantes qui se sont trouvées affectées, soit quelques 4,5 millions de personnes.

Un bilan médical est difficile à établir en l'absence d'un suivi rigoureux des personnes touchées, à prolonger pendant de longues années, étant donné que le risque principal est l'apparition de cancers. D'où l'imprécision des estimations de décès probables, qui vont de 4 000 pour l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) à 20000 selon d'autres études.

Si l'on ajoute à tout cela les drames humains : 350000 personnes déplacées, qui ont dû tout abandonner et les effets de la contamination des sols et de la végétation sur 1,5 million d'hectares - sans oublier les retombées du nuage radioactif qui continuent de nourrir les polémiques - c'est bien d'une catastrophe majeure qu'il s'agit.

Les conséquences : le public apprend avec stupeur le désastre de TCHERNOBYL. Cette fois, c'est au sein même de l'atome pacifique que resurgit le cauchemar d'HIROSHIMA. L'opinion prend brutalement conscience des risques potentiels de cette énergie et porte désormais un autre regard sur elle, fait de crainte vis-à-vis des installations existantes, d'opposition à toute réalisation nouvelle et de méfiance vis-à-vis des responsables soupçonnés d'en minimiser les dangers.

Cette évolution des esprits est relayée par l'émergence de la pensée écologique : l'homme est devenu maître de la nature. Il est capable d'en épuiser les ressources, de modifier les équilibres biologiques, d'initier des processus qui menaceront les générations à venir. Dans cet ordre d'idées, le nucléaire apparaît comme

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

un instrument maléfique inventé par l'homme devenu apprenti sorcier et, à ce titre, il doit être combattu par tous les moyens.

L'image du nucléaire en ressort durablement altérée et les programmes en subissent le contrecoup. La plupart des projets de construction de nouvelles centrales sont stoppés. Certains pays décident de sortir du nucléaire ; c'est le cas de la Suède et de l'Allemagne.

En France, les mises en chantier de réacteurs ont été arrêtées au début des années 1990, mais viennent de reprendre avec la construction de l'EPR sur le site de FLAMANVILLE.

La leçon que l'on retiendra de TCHERNOBYL est que l'énergie atomique ne peut se permettre la moindre défaillance en matière de sécurité et doit tout mettre en œuvre pour les supprimer. Cela vaut pour la conception des installations en appliquant ce qu'on appelle le « principe de redondance », c'est-à-dire le doublement, ou mieux encore le triplement des dispositifs de sécurité, pour se mettre à l'abri de toute panne ou en faisant appel aux asservissements électroniques pour bloquer toute fausse manœuvre. Cela concerne tout autant le facteur humain - en veillant à maintenir constante la compétence des équipes de conduite par une formation continue - et en développant une culture de la sûreté à partir de l'analyse en commun des difficultés rencontrées.

De fait, sur les 58 réacteurs en service en France, dont la durée moyenne d'existence est de 20 ans, aucun incident sérieux n'a été relevé.

LES NOUVELLES PISTES DE RECHERCHE

Nous retiendrons trois axes majeurs :

- Les réacteurs du futur
- La gestion des déchets radioactifs
- La fusion contrôlée

a) Les réacteurs du futur :

Les REP ont fait leur preuve, non seulement en France, mais dans le monde entier. Il n'est pas interdit pour autant d'essayer de faire mieux.

Deux étapes dans cette démarche :

- Celle d'aujourd'hui, avec la construction en cours en Finlande à OLKILUOTO et en FRANCE sur le site de FLAMANVILLE, d'un réacteur EPR. Il s'agit d'une version sensiblement améliorée des REP, développée sous licence SIEMENS et AREVA (société qui a pris la suite de la COGEMA avec un champ d'action élargi). Les progrès portent à la fois sur la sûreté (quatre systèmes indépendants de

refroidissement, double enceinte en béton de 1,30 m chacune, cuve de récupération en cas de fusion du cœur, piégeage de l'hydrogène) - et sur le niveau des performances (1 500 MW, fonctionnement à l'U enrichi à 5 %, 60 ans de durée de vie, diminution de 10 % du coût de l'électricité produite). Le modèle est appelé à devenir la tête de série pour le renouvellement des réacteurs actuels.

- L'étape suivante est plus prospective (horizon 2030 - 2040) et s'intéresse à des concepts vraiment novateurs (souvent imaginés dans le passé) dont il convient de vérifier l'intérêt. Dix pays se sont rassemblés (États-Unis, Japon, Grande-Bretagne..., France) dans un Forum international appelé génération IV afin de se partager la tâche.

La France est intéressée :

- Par les réacteurs à sels fondus, qui seraient étudiés par le CNRS (dans ce concept, le combustible est du Thorium liquide retraité en continu)
- Par les réacteurs à haute température « refroidis » à l'Hélium à 850°, qui seraient le lot du CEA. Le modèle semble présenter de grands avantages de rendement, de sûreté et de simplicité. Ironie de l'histoire : son combustible est fondé de microbilles d'Uranium enrobées de graphite comme celui de la première Pile d'Enrico FERMI en 1942 à Chicago.

b) La gestion des déchets radioactifs :

Les déchets radioactifs, dont la durée de vie s'exprime pour certains d'entre eux en dizaines de milliers d'années, sont un peu le « Talon d'ACHILLE » du nucléaire. Comment s'en débarrasser ?

La question s'est posée dès les années 1950 lorsque les piles de Marcoule ont commencé de fonctionner. Les volumes étaient encore limités et l'on s'est contenté d'entreposer les combustibles irradiés sur place. Le problème a pris une autre dimension avec l'accélération du programme électronucléaire et il a fallu imaginer une stratégie d'ensemble. L'Office des Déchets a été créé à cet effet en 1978 (il deviendra l'Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA), distincte du CEA, que nous connaissons aujourd'hui).

On distingue quatre catégories de déchets :

Les deux premières, qui représentent en volume 90 % du total, ont trouvé des solutions de stockage appropriées.

- Les déchets à très faible activité (c'est-à-dire proche de la radioactivité naturelle) disposent d'un site de décharge à MORVILLIER dans l'AUBE.

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

- Les déchets de faible à moyenne activité à vie courte (dont la radioactivité devient négligeable après 300 ans) sont conditionnés dans des conteneurs en béton ou dans des fûts métalliques, puis placés dans des casemates recouvertes de terre. L'ANDRA gère deux sites de stockage surveillés en permanence, celui de la Manche près de La Hague, aujourd'hui saturé, et celui de Soulaines près de Bar-sur-Aube.

Les difficultés se concentrent sur les deux dernières catégories :

- Les déchets de faible à moyenne activité à vie longue
- Les déchets de très haute activité

Ces produits sont actuellement entreposés sur place dans les sites nucléaires. Différentes techniques ont été mises au point pour réduire la production des déchets. Un procédé de conditionnement s'est révélé particulièrement intéressant : la vitrification, obtenue dès 1963 en coulant des éléments radioactifs dans du verre en fusion, qui résiste ensuite à la plupart des agressions.

Reste à savoir quel sort définitif réserver à ces déchets ?

C'est là qu'intervient la loi de décembre 1991, dite loi BATAILLE, qui désigne trois voies à explorer dans le but d'aboutir à une décision fin 2006. Cette échéance a été repoussée afin de poursuivre les études qui portent sur :

- L'entreposage en surface ou en sub-surface, indispensable en tant qu'étape intermédiaire, pourrait être porté à quelques centaines d'années, ne serait-ce qu'en raison du coût de la maintenance.
- Le stockage en formation géologique profonde fait l'objet d'une expérimentation poussée au laboratoire souterrain de BURE dans la Meuse, en sol argileux. Sa faisabilité ne paraît pas mise en cause. Il peut être réversible ou irréversible, mais l'opinion n'acceptera pas la seconde option.
- La troisième voie s'attaque à la racine du problème : essayer de transformer ces produits dangereux en éléments moins agressifs et ceci en deux opérations :
- Séparer d'abord les uns des autres les produits de fission (étroitement associés dans la réaction en chaîne : américium, curium, césium...).
- Les «transmuter» ensuite en éléments à vie courte au cours d'un passage dans un réacteur. Les études de séparation poussée menées en labo ont donné de bons résultats. La transmutation se révèle peu efficace dans les REP, mais devrait réussir dans les réacteurs à neutrons rapides, tel Phénix à Marcoule où des essais sont en cours.

On peut penser que les trois solutions continueront de cheminer en parallèle, chacune s'appliquant aux situations pour lesquelles elle est le mieux adaptée.

c) La fusion contrôlée :

Nous terminerons le voyage à travers l'histoire de l'énergie atomique comme nous l'avons commencée par un peu de science.

Le succès remporté par la France en juin 2005 en obtenant l'implantation à CADARACHE du réacteur de fusion ITER avait suscité dans la presse des commentaires lyriques : nous allons capter l'énergie des étoiles, disposer d'une énergie propre et inépuisable.

De quoi s'agit-il en réalité ?

Il existe à côté de la fission un second exemple de réaction de fusion réaction nucléaire, plus puissante encore, celle de la fusion. Contrairement à la première, elle ne met pas en jeu les atomes les plus lourds, mais les plus légers ; elle ne résulte pas du fractionnement d'un noyau, mais du «mariage» de deux noyaux. Concrètement, un atome de deutérium (un neutron) se rassemble avec un atome de tritium (deux neutrons) pour former un atome d'hélium. Comme l'hélium ne peut comporter que deux neutrons, le neutron excédentaire est expulsé, libérant une énergie considérable, de même nature que celle qui règne au sein des étoiles.

Encore faut-il, pour y parvenir, vaincre la barrière électrostatique répulsive qui empêche les noyaux de se rapprocher. Cela n'est possible qu'à des températures supérieures à 100 millions de degrés pendant un temps suffisamment long. On mesure le défi technologique à relever pour domestiquer la fusion.

a) Le premier appareil expérimental remonte à 1957. Il est l'œuvre d'un grand pionnier, le russe ARTSIMOVITCH, qui a imaginé un modèle (dont on s'inspire toujours aujourd'hui) en forme de TORE (Tokamak en russe), une sorte d'énorme «chambre à air» autour de laquelle sont installées des bobines magnétiques, qui créent des champs intenses capables de confiner la réaction dans un «anneau immatériel» à l'intérieur du Tore sans en toucher les parois et d'atteindre les températures requises avec le soutien de systèmes de chauffage additionnels. Il s'agissait alors des premiers pas dans la voie de la fusion contrôlée.

La France met en service un premier Tokamak à FONTENAY en 1973, puis un second à CADARACHE en 1988 (Tore Supra), tandis que l'Europe installe le JET à CULHAM en

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

Angleterre en 1984. Les deux derniers appareils ont obtenu des résultats encourageants :

- Tore Supra pour la durée de réaction : 6 minutes en continu.



- Le JET pour la puissance : 16 MW. La fusion contrôlée est un domaine de recherche plein d'obstacles et de promesses. Très difficile, parce qu'il faut arriver à mettre au point des matériaux et des modes d'exploitation capables de tenir à des températures extrêmes et de résister à des rayonnements neutroniques plus pénétrants encore que ceux de la fission. Mais très séduisant aussi :
- Les matières premières utilisées sont accessibles et abondantes (le deutérium est contenu dans l'eau à raison d'un gramme pour 20 litres ; le tritium est obtenu par irradiation du lithium assez répandu dans l'écorce terrestre),
- La fusion ne crée pas de déchets (l'hélium produit n'est pas radioactif), hormis les structures des appareils qui seront irradiées,
- La réaction s'arrête à la moindre perturbation.

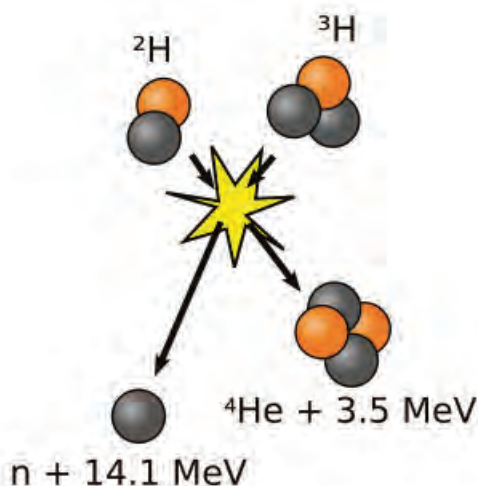


Schéma d'une réaction de fusion

Pour aller plus loin dans cette aventure, sept pays (Etats-Unis, Chine, Russie, Japon, Inde, Corée du Sud et Europe) ont décidé de mettre en commun leurs moyens pour réaliser un appareil de plus grande dimension bénéficiant des technologies les plus modernes : ITER. L'objectif est de démontrer la faisabilité scientifique, technique et économique de la fusion, avec des spécifications précises ; être capable d'atteindre 500 MW pendant 400 secondes et fournir 5 à 10 fois plus d'énergie que consommée. L'expérimentation devrait s'achever vers 2030 dans la perspective de l'étape suivante : la réalisation d'un premier prototype de production d'électricité. ... si tout se passe comme espéré !

La partie n'est pas gagnée d'avance, mais vaut la peine d'être engagée.

b) Les applications militaires de la fusion ont été plus précoces et mieux connues que les recherches civiles. Dès 1952, la première bombe thermonucléaire, mise au point par les américains, explose au-dessus de l'atoll d'ENIWETOK, suivie de la seconde - plus célèbre - dans le ciel de BIKINI en 1954. La France accède à cette technique en 1968 avec un tir (premier essai) FANGATAUFA.

Il est vrai que la fusion se prête plus facilement à une utilisation instantanée. Dans la bombe H, la fission joue le rôle d'amorce en fournissant à la fusion les niveaux de température et de pression requises pour lui permettre de s'enclencher.

La signature du Traité d'interdiction des Essais Nucléaires par la France en 1996 pose le problème du maintien en état de la force de dissuasion. En l'absence d'expérimentation en vraie grandeur, on est conduit à recourir à la solution de la modélisation - simulation, souvent utilisée en matière atomique. Si l'on parvient en effet à repérer tous les paramètres et toutes les phases qui entrent en jeu dans un phénomène physique, il devient possible de le traduire en formules mathématiques (la modélisation) et de concevoir des appareillages qui en reproduisent les séquences les plus importantes (la simulation). A partir de là, on dispose d'instruments pour analyser au plus fin la réalité et pour explorer des situations nouvelles (vieillesse des armes, durcissement aux agressions extérieures...).

Trois grands outils sont en cours de réalisation



- Sur le site de la DIF le Super Calculateur TERA100, pour la modélisation. Il est constitué de 4322 serveurs, soit près 140000 cœurs dont la puis-

L'histoire de l'énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours

sance totale pourra dépasser 1000 000 milliards d'opérations par seconde (1 pétaflop). Ces chiffres «astronomiques» donnent une idée de la précision nécessaire pour traquer l'infiniment petit dans ses moindres recoins.

- Sur le site du CESTA, le laser Mégajoule, consacré à la simulation. 240 faisceaux lasers seront amenés par tout un jeu d'appareils optiques à converger sur une microbille de 2 mm, contenant quelques milligrammes de deutérium - tritium, avec une énergie lumineuse de 1,8 millions de joules. Le but est de se placer dans les conditions physiques représentatives de la fusion sans conduire à une explosion nucléaire.



Laser Mégajoule

- Sur le site de Valduc, l'appareil de radiographie éclair Airix. Il permet d'examiner dans un temps très bref d'une implosion les mouvements de matières précédant le fonctionnement nucléaire d'une arme. Cette machine est le plus puissant générateur de rayons X jamais construit,



Airix : vue banc d'énergie

L'avenir est encore riche en recherches passionnantes, qu'il s'agisse des réacteurs de demain, de la transmutation des

déchets ou de la domestication de la fusion, sans oublier la recherche fondamentale, toujours fertile en découvertes.

Ainsi s'achève mon propos.

Je me suis gardé de prendre parti dans les polémiques qui ont émaillé l'histoire de l'énergie atomique, faute d'une compétence suffisante pour trancher en toute connaissance de cause sur le fond des débats.

Je souhaiterais seulement que vous retiriez de ces quelques pages une conviction renforcée sur : la compétence scientifique, le savoir faire et la longue expérience du personnel nucléaire français.

C'est ainsi que j'ai vécu ma présence auprès de mes collègues Ingénieurs et Chercheurs. Il s'agit d'un atout essentiel, qu'il convient de ne pas perdre de vue quand vient l'heure des décisions difficiles.

BIBLIOGRAPHIE

- Un peu de science pour tout le monde - Claude ALLEGRE - Fayard , 2003
- Les CURIE, pionniers de l'atome - Pierre RADV ANYI - Belin, 2005
- Le Commissariat à l'Énergie Atomique - Marie-José LOVERINI - Gallimard et CEA, 1995
- De TCHERNOBYL en TCHERNOBYLS - Georges CHARPAK et Consorts - Odile JACOB, 2005
- Le siècle du nucléaire : 2003 - 2100 - n° hors série SCIENCE & VIE - 12/2003

DOCUMENTS CEA :

- 1896 - 1995 : 100 ans de nucléaire repères chronologiques - Jean COLOMER Annie ESKENAZI-FRANC - 1997
- Collection de 14 brochures sur les différentes facettes de l'activité du CEA
- Gestion des déchets radioactifs - n° hors série « les défis du CEA » - 2005
- 24 fiches argumentaires de l'Association des Retraités du CEA