

La plus récente et l'une
des plus petites du monde

ZOÉ, PILE ATOMIQUE FRANÇAISE

est la première du continent européen

La France a pris rang parmi les nations « atomiques ». Le 15 décembre dernier, la première pile française était mise en marche au fort de Châtillon. Nullement destinée à confectionner des bombes, elle doit permettre la mise au point des techniques nécessaires à la réalisation de piles plus puissantes actuellement à l'étude.

Nous avons pris depuis peu conscience que notre monde est entré dans une ère nouvelle, l'ère atomique. Est-il possible de fixer une date précise au commencement de celle-ci ?

Certains proposent 1895, quand le Français Becquerel découvrit la radioactivité.

Pour d'autres, c'est seulement le 16 juillet 1945 lorsque éclata à Los Alamos, non loin du célèbre « camp de concentration pour Prix Nobel », dans le désert du Nouveau Mexique, la première bombe atomique.

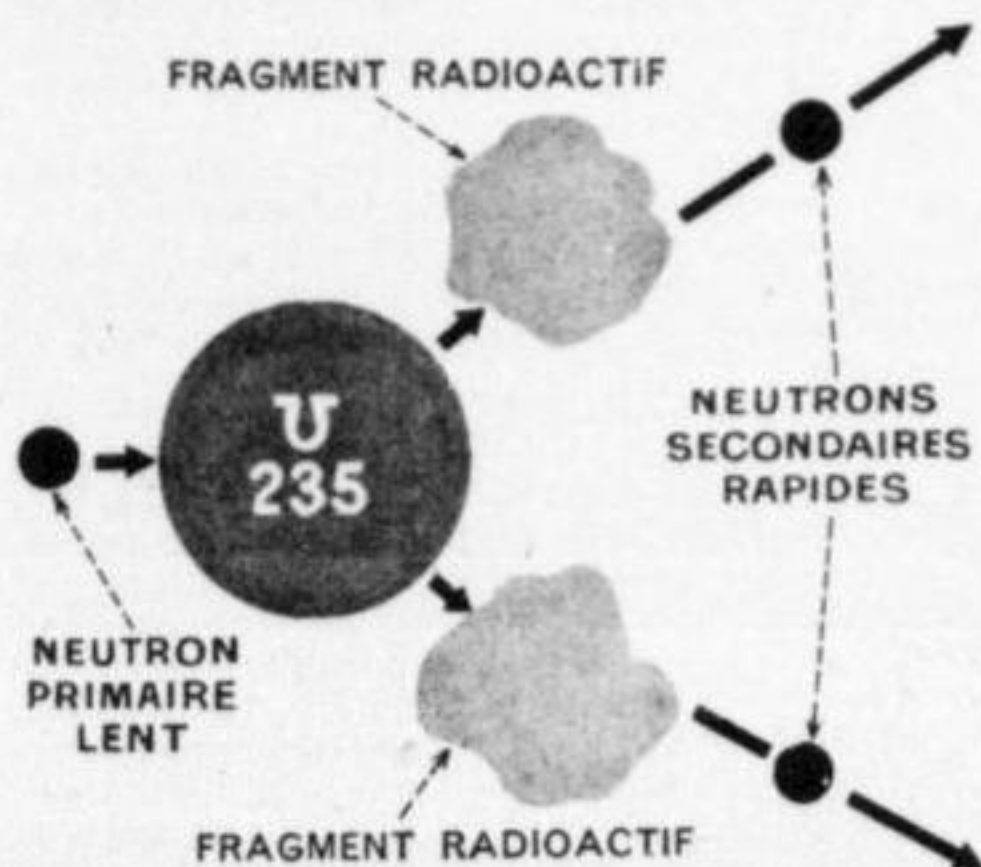
Les historiens de l'avenir s'accorderont sans doute pour adopter la date du 2 décembre 1942. C'est ce jour-là, en effet, que, sous les gradins du stade de football de l'Université de Chicago, la première « pile » réalisée dans le monde entra en fonctionnement. Bien que sa puissance ait pu être portée par la suite à 200 W, elle ne fournit, au début, qu'une fraction de watt.

La première pile française, démarrée le 15 décembre dernier au fort de Châtillon, près de Paris, ne fournit encore qu'une puissance du même ordre. Nous verrons plus loin qu'elle pourra être portée à 5 kW, chiffre encore modeste à côté des puissances développées par les piles américaines qui dépassent plusieurs centaines de milliers de kilowatts. Mais c'est une étape indispensable sur la voie qui conduira peut-être aux grandes centrales atomiques françaises.

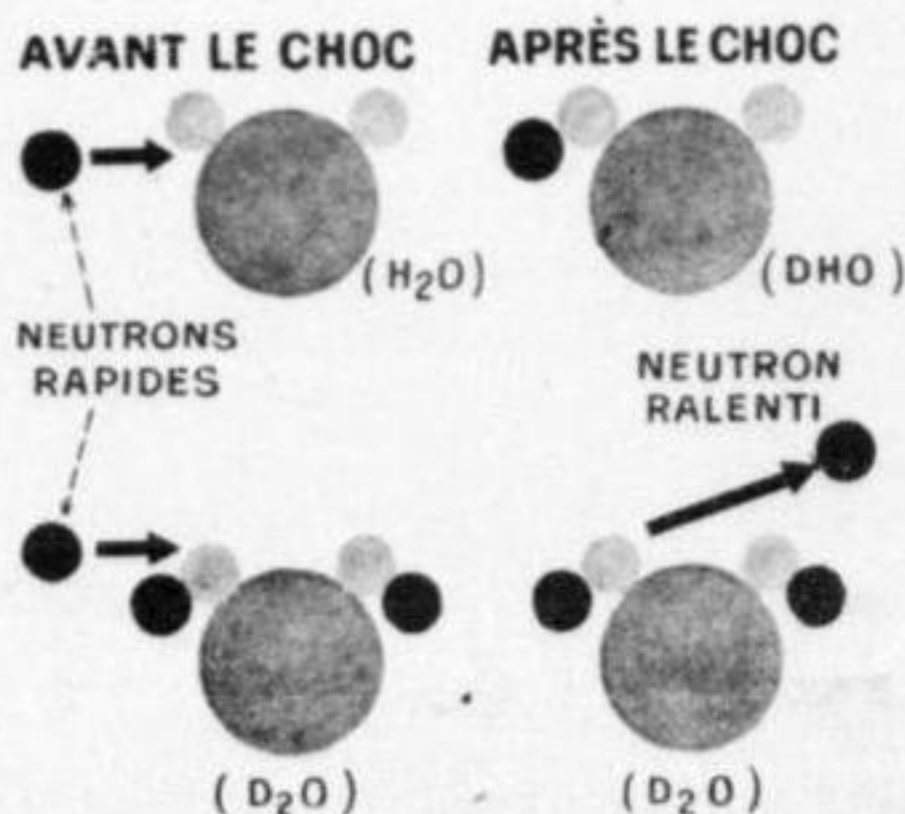
Les travaux de l'Italien Fermi

A l'Université de Rome, en 1934, le physicien italien Fermi (Prix Nobel de Physique en 1938) avait entrepris des recherches systématiques sur les résultats du bombardement de tous les éléments connus par des neutrons.

Nous rappellerons rapidement que le neutron est un des deux constituants fondamentaux des noyaux des atomes, l'autre étant le proton. Tous deux ont sensiblement la même masse (il en faut environ 100 milliards de milliards pour faire 1 mg) ; le proton porte une charge électrique positive, tandis que le neutron, comme son nom l'indique, est électriquement neutre. Lorsqu'un neutron rencontre un noyau d'atome, il s'y incorpore facilement, car il n'est pas repoussé par la charge électrique de ce dernier. Le noyau ainsi alourdi est instable et il se désintègre au bout d'un temps plus ou moins long (on dit que l'on a affaire à un « isotope radioactif »). Le plus fréquemment, au sein du noyau, le neutron en surnombre se transforme en un proton. De ce fait, la charge électrique du noyau augmente d'une unité et comme c'est cette charge qui détermine les propriétés chimiques, on a affaire à un élément entièrement différent du premier, celui qui le suit immédiatement dans la classification générale où les éléments sont rangés d'après la charge de leur noyau.



La fission : deux neutrons en moyenne sont émis qu'il faudra ralentir pour que la réaction en chaîne s'établisse.



Les neutrons sont absorbés dans l'eau ordinaire (en haut) et ralentis sans absorption dans l'eau lourde.

Lorsque Fermi en vint à étudier l'action des neutrons sur l'uranium, il observa, comme avec les autres éléments, des radioactivités nouvelles. Mais l'interprétation de ce résultat était délicate, car l'uranium se trouvait être le dernier terme de la classification ; aucun élément connu dans la nature ne venait à sa suite. Fallait-il admettre la formation d'éléments inconnus ? C'est ce que fit Fermi, qui pensait avoir créé des éléments « transuraniens », c'est-à-dire dont les noyaux porteraient des charges supérieures à celles des noyaux d'uranium. Ses vues étaient exactes dans une certaine mesure, car on sait aujourd'hui que c'est ainsi que peuvent se former les éléments que les physiciens américains ont isolés par la suite : neptunium, plutonium, americium et curium. Mais il passait à côté du phénomène capital : l'éclatement du noyau.

Mlle Noddack, Irène Joliot-Curie...

Une chimiste allemande, Mlle Noddack, pressentit la découverte. Dès 1935, elle critiqua l'interprétation des physiciens italiens et suggéra que l'uranium devait être décomposé par les neutrons suivant un mécanisme encore inconnu et livrait des éléments chimiques de charge atomique plus faible que celle de l'uranium, ce qui rendait inutile l'hypothèse des transuraniens. La chimiste allemande eut tort de ne pas pousser ses recherches, car elle était sur la bonne voie.

De nombreux physiciens et chimistes, et non des moins célèbres, reprirent ces expériences avec les neutrons, chacun apportant une parcelle de vérité. Le problème était particulièrement ardu, comme tous ceux qui touchent aux éléments radioactifs artificiels. Ces derniers sont toujours produits dans les laboratoires en quantités infimes et leur « vie » est généralement très brève. Pour les identifier par des méthodes chimiques, il faut opérer très rapidement, par précipitations successives avec des éléments auxquels ils sont apparentés chimiquement (on appelle cela une « séparation »), et comme on se guide sur des analogies, il subsiste toujours quelque incertitude. Irène Joliot-Curie et Savitch, en 1938, trouvèrent ainsi une activité dans une séparation de lanthane, élément de poids atomique moyen. Indépendamment, un chimiste allemand, Otto Hahn, trouva une activité dans une séparation de baryum. D'après les idées classiques, aucun élément transuraniens n'aurait dû avoir de propriétés chimiques analogues à celles du lanthane et du baryum. Le mystère était complet.

« Fission » et réaction en chaîne

Enfin, les professeurs allemands O. Hahn et F. Strassmann, à Berlin, firent le pas décisif, non sans hésitation. Ils prouvèrent définitivement, dans un mémoire du 6 janvier 1939, que le noyau d'uranium, sous l'action des neutrons, au lieu d'expulser un petit fragment de noyau, comme on l'avait toujours observé jusque-là dans les transmutations, se fendait en deux fragments de masses atomiques comparables. C'était la « fission », que, dans tous les pays du monde, les physiciens se mirent à étudier fébrilement.

Le physicien viennois Otto Frisch, qui travaillait à Copenhague, et Frédéric Joliot-Curie, à Paris, apportent les premiers, et indépendamment, la preuve qu'une énorme quantité d'énergie est libérée lors de la fission d'un atome d'uranium. Naturellement, le qualificatif d'énorme ne convient qu'à l'échelle atomique ; cette quantité d'énergie est encore extrêmement faible à l'échelle humaine. Mais, dès 1939, Frédéric Joliot-Curie et ses collaborateurs, Halban et Kowarski, au Collège de France, l'Italien Fermi et le Hon-

grois Sziliard, aux États-Unis, prouvent que la fission s'accompagne de l'émission de neutrons nouveaux (dits secondaires), le neutron qui a provoqué l'explosion étant appelé primaire. Si deux ou trois neutrons sont ainsi émis à chaque fission, en traversant la masse d'uranium ils doivent rencontrer d'autres atomes et provoquer de nouveaux éclatements ; la réaction, une fois amorcée, doit se poursuivre indéfiniment, en s'amplifiant constamment avec une allure explosive, si rien ne vient l'arrêter.

Le principe d'une telle « réaction en chaîne » avait été parfaitement compris au Collège de France dès cette époque, ainsi que la nécessité d'interposer sur le parcours des neutrons secondaires un ralentisseur de neutrons, ou « modérateur », qui devait permettre de freiner la réaction et de s'en rendre maître. Au printemps de 1939, des brevets furent déposés. Ils sont encore « ajournés », donc secrets.

Mais l'expérience cruciale qui doit démontrer la possibilité pratique d'une réaction en chaîne à grande échelle et non plus seulement à l'échelle atomique reste à faire. La France acquiert pour cela le stock mondial d'eau lourde que détient la Norvège (165 l) pour constituer le modérateur — nous verrons plus loin les raisons de ce choix — et, grâce aux mesures prises par M. Raoul Dautry, ministre de l'Armement à cette époque, l'acheminement en sécurité sur son territoire, où les événements de 1940 empêchent de l'utiliser. Avec les collaborateurs immédiats de M. Joliot-Curie, Halban et Kowarski, cette eau lourde repart pour l'Angleterre. En décembre 1940, à Cambridge, ces deux chercheurs démontrent enfin la possibilité de la réaction en chaîne, prouvant en même temps qu'il faut plusieurs tonnes d'eau lourde et plusieurs tonnes d'uranium pour la réaliser effectivement. Ces chiffres dépassent de beaucoup les moyens dont ils disposent, mais les savants de tous les pays sont alertés, les gouvernements commencent à s'émouvoir, et, aux États-Unis, des crédits énormes sont offerts à ces recherches. Deux ans après, la première pile américaine entrait en fonctionnement et cinq ans après, les bombes atomiques ravageaient Hiroshima et Nagasaki.

La première pile française

Pendant toute la durée de la guerre, les recherches atomiques en France demeurèrent au point mort. Ce n'est qu'en 1945, après la Libération, qu'on put envisager à nouveau de consacrer une partie de l'activité scientifique et industrielle et des crédits, d'ailleurs fort limités, à l'édification de piles atomiques.

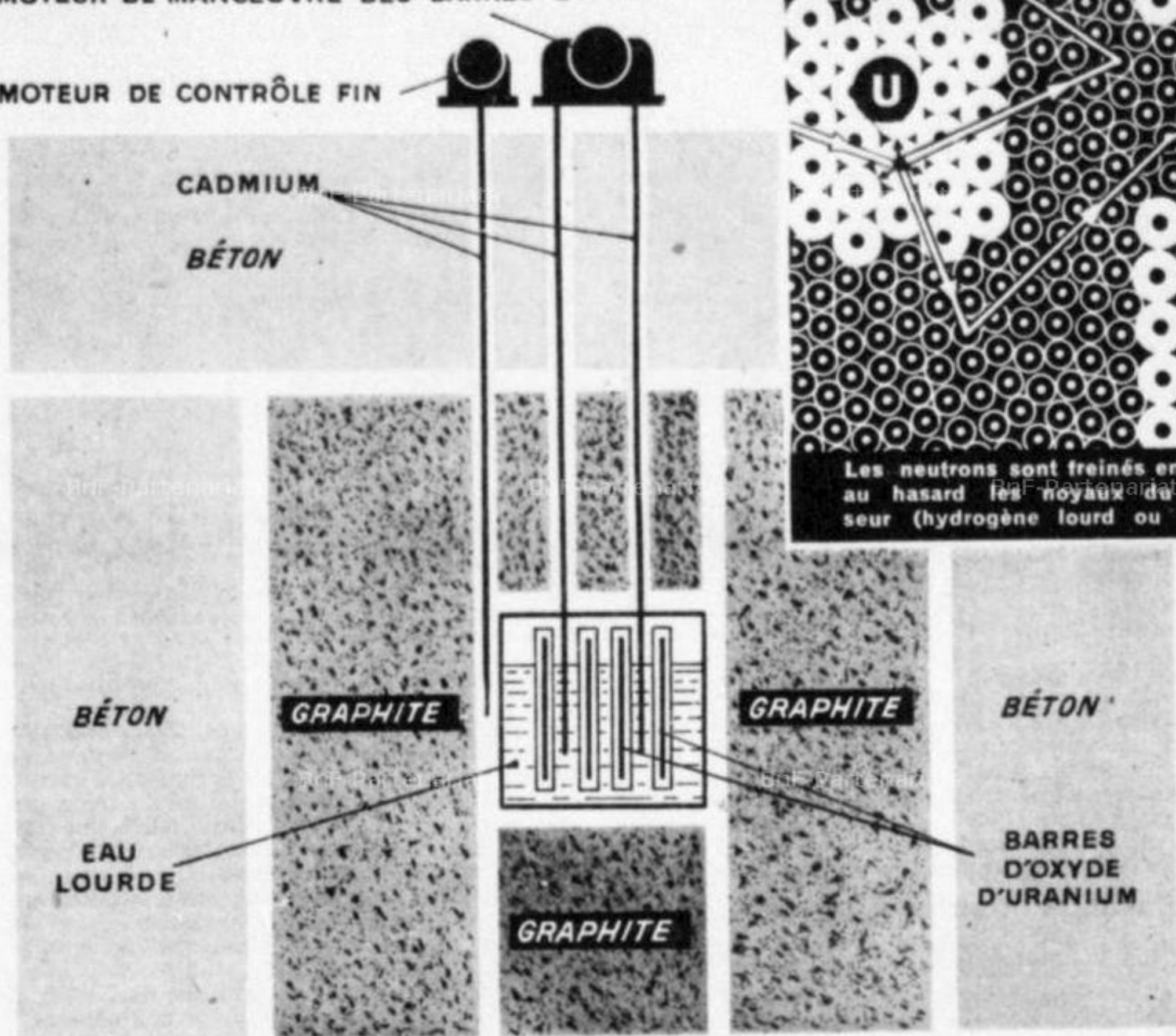
Un commissariat à l'Énergie Atomique fut créé et sa direction confiée à Frédéric Joliot-Curie, qui rassembla les membres de son ancienne équipe : Lew Kowarski, Jules Guéron, Bertrand Goldschmidt, qui avaient participé pendant la guerre aux recherches d'outre-Atlantique.

Les premiers fruits de cette organisation ont été divulgués le 15 décembre 1948. A 12 h 12, la première pile française, baptisée « ZOE » (Z pour énergie zéro, O pour oxyde d'uranium, E pour eau lourde), a été mise en marche au fort de Châtillon près de Paris. Sa puissance qui, au début, n'était que de quelques milliwatts, pourra être poussée peut-être jusqu'à 5 kW. Cette valeur encore faible dispense de dispositif de refroidissement. C'est essentiellement une pile expérimentale destinée à la mise au point des techniques nécessaires à la réalisation de piles plus puissantes, dont une, espère-t-on, sera montée à Saclay, dans la banlieue sud-ouest de Paris, en 1954. Il est hors de question que ZOE

SCHÉMA D'UNE PILE A EAU LOURDE

MOTEUR DE MANOEUVRE DES BARRES D'ARRÊT

MOTEUR DE CONTRÔLE FIN



puisse servir à fabriquer une bombe atomique.

La pile ZOE contient de l'oxyde d'uranium purifié à l'extrême et comprimé (densité 8,4) à défaut d'uranium métallique dont la préparation aurait exigé des installations métallurgiques importantes et une longue mise au point.

Le modérateur est constitué par de l'eau lourde, dont près de 6 000 l remplissent le bac d'aluminium dans lequel sont répartis les blocs d'oxyde d'uranium enveloppés, eux aussi, d'aluminium pour éviter la corrosion. Cette eau lourde, dont le nom évoque quelque corps mystérieux pour le profane, n'est autre qu'un composé analogue à l'eau ordinaire ; celle-ci étant formée d'oxygène et d'hydrogène, l'eau lourde est composée d'oxygène et d'hydrogène *lourd*, lequel porte dans son noyau un proton et un neutron, alors que l'hydrogène ordinaire ne porte qu'un proton. C'est cette constitution qui rend l'eau lourde précieuse dans une pile atomique, car son hydrogène *lourd*, qui possède déjà un neutron dans son noyau, n'absorbe pas les neutrons, alors que l'hydrogène ordinaire les capte pour donner précisément de l'hydrogène *lourd*.

Autour du bac cylindrique d'aluminium de ZOE se trouve, épaisse de quelques centimètres,

une muraille de graphite destinée à renvoyer vers la pile une partie des neutrons qui s'en échappent et seraient perdus pour la réaction.

Enfin, l'ensemble est enveloppé de murs de béton de près de 1,5 m d'épaisseur qui doivent arrêter les neutrons et les rayons gamma très pénétrants émis en grande quantité, lors des fissions, par les débris des atomes, qui sont fortement radioactifs. La pile se présente ainsi sous la forme d'un cube de 5 m de côté environ, percé de trous où l'on peut introduire, à l'extrémité de longs tubes d'aluminium, les échantillons des substances que l'on veut soumettre aux neutrons pour obtenir des éléments radioactifs artificiels.

La sécurité des opérateurs dans la salle où se dresse la pile est assurée par de nombreux appareils détecteurs de rayonnements, qui provoquent l'arrêt instantané de ZOE dès que le rayonnement qui traverse le béton devient dangereux.

Sur une des faces de la pile, une porte blindée masque, dans la paroi de béton, une ouverture remplie d'un matériau spécial par où peut être extraite une « colonne de neutrons lents » pour des recherches scientifiques.

Dans un angle de la salle est installé le tableau de contrôle qui groupe les appareils de mesure,

LES PILES ATOMIQUES DANS LE MONDE

Emplacement	Date	« Combustible »	Modérateur	Refroidissement	Puissance
Chicago (U. S. A.)	2-12-42	Uranium + oxyde d'uranium	Graphite	Aucun	200 W
Oak Ridge I (U. S. A.)	4-11-43	Uranium	Graphite	Air	Plus de 2 000 kW
Argonne I (U. S. A.)	1943	Uranium + oxyde d'uranium	Graphite	Aucun	Quelques kW
Hanford (3 piles) (U. S. A.)	1944-45	Uranium	Graphite	Eau ordinaire	Beaucoup plus de 1 000 kW
Argonne II (U. S. A.)	15-5-44	Uranium	Eau lourde	Eau lourde	Plus de 300 kW
Los Alamos (U. S. A.)	1944	Uranium enrichi (mélange homogène)	Eau ordinaire	Eau ordinaire	1 kW
Chalk River (Canada)	1945	Uranium	Eau lourde	Eau lourde	
Oak Ridge II (U. S. A.)	1947				1 000 000 kW
Harwell (GLEEP) (Angleterre)	15-8-47	Uranium + oxyde d'uranium (7 tonnes)	Graphite (10 tonnes) Eau lourde (2 tonnes)	Air	100 kW
Harwell (BEPO) (Angleterre)	Juillet 1948		Graphite	Air	5 000 kW
Brookhaven (U. S. A.)	1948				
Châtillon (ZOE) (France)	15-12-48	Oxyde d'uranium	Eau lourde (6 tonnes)	Aucun	1 à 5 kW

Il faut signaler qu'une pile contenant 2 t d'uranium a dû fonctionner, pendant la guerre, à Haigersloch (Allemagne). Il existe très probablement des piles en U. R. S. S. (Atomograd ?) et peut-être en Espagne où elles auraient été installées par les Allemands. Enfin des piles atomiques sont en construction à Stockholm (Suède) et à Zurich (Suisse).

les boutons de commande de mise en marche et d'arrêt instantané et les volants de réglage de la puissance. Celle-ci s'effectue en agissant sur le nombre de neutrons réfléchis par la muraille de graphite en glissant des plaques de cadmium qui absorbent les neutrons entre elle et la cuve. Toutes ces opérations sont faites à distance.

Comment fonctionne une pile

La condition essentielle du fonctionnement d'une pile est qu'il puisse s'y établir une réaction en chaîne telle que nous l'avons exposée.

Il faut donc en premier lieu opérer avec des matériaux très purs, les moindres impuretés étant susceptibles d'absorber les neutrons. En particulier, l'uranium métallique est de beaucoup préférable à l'oxyde d'uranium, l'oxygène fixant des neutrons qui auraient pu provoquer des fissions.

D'autre part, un grand nombre de neutrons qui n'ont pas rencontré d'atomes s'échappent de la surface de la pile et se perdent dans l'espace. Pour réduire cette perte, il faut accumuler une masse suffisante d'uranium, que l'on appelle la « masse critique ». On voit, en effet, immédiatement que le nombre de neutrons dans la pile croît comme sa masse, donc comme le cube de ses dimensions, tandis que le nombre de neutrons perdus dans l'espace croît seulement comme sa surface extérieure, donc comme le carré de ses dimensions. La perte relative sera d'autant plus faible que les dimensions seront plus grandes.

On peut réduire aussi cette perte en entourant la pile d'un réflecteur de neutrons, en carbone, par exemple. Les neutrons heurtent les atomes de carbone, changent plusieurs fois de direction, et un certain nombre sont renvoyés vers la pile.

Enfin, une troisième cause défavorable tient à la nature même de l'uranium et aux conditions dans lesquelles s'effectue la fission. L'uranium naturel est composé principalement de deux sortes d'atomes : les uns dont le noyau groupe 238 particules (146 neutrons et 92 protons), les

autres dont le noyau groupe 235 particules (143 neutrons et 92 protons). Ce sont ces derniers seulement qui peuvent subir la fission, et encore ne la subissent-ils que lorsque les neutrons qui les frappent n'ont qu'une vitesse faible. Au contraire, les neutrons qu'ils émettent en explosant ont des vitesses considérables. Il faut donc les ralentir. Pour cela, on mélangera à la masse un élément capable de ralentir les neutrons sans les absorber tout au moins d'une manière appréciable. De tels éléments ne sont pas très nombreux. On n'en utilise en pratique que deux, le carbone, sous la forme de graphite, et l'hydrogène lourd, sous la forme d'eau lourde, dont nous venons de parler. Le facteur de ralentissement de l'eau lourde est supérieur à celui du carbone ; c'est pourquoi une pile à l'eau lourde est moins volumineuse qu'une pile au graphite. Chaque neutron, dans ses chocs successifs contre les noyaux de ces atomes, perd peu à peu son énergie. Mais, si le mélange d'uranium et de ralentisseur est homogène, une difficulté surgit du fait que l'uranium à 238 particules manifeste une grande prédilection pour les neutrons d'une certaine énergie. Il les absorbe et les empêche ainsi d'atteindre le niveau convenable pour la fission de l'uranium à 235 particules, car on ne compte qu'un atome de ce dernier pour 139 atomes du premier. C'est là que se manifestent les avantages du mélange hétérogène d'uranium et de ralentisseur, constitué de blocs d'uranium noyés dans du graphite ou de l'eau lourde. Toutes les piles existantes, sauf une, sont ainsi construites.

Lorsqu'on édifie une pile en empilant des blocs ou des barres d'uranium et de modérateur, ou en noyant ces barres dans de l'eau lourde, il arrive un moment où la masse critique est atteinte, c'est-à-dire où la réaction en chaîne se manifeste. Il serait imprudent alors d'ajouter d'autres matériaux avant d'être en mesure de contrôler le fonctionnement de l'ensemble. La mise en marche s'effectue en effet spontanément

puisque'il suffit d'un seul neutron traversant la masse. Il y a toujours des neutrons erratiques dans l'atmosphère et il ne faut pas oublier en outre que l'uranium est un élément naturellement radioactif et qu'une impureté, toujours présente malgré toutes les précautions, peut émettre des neutrons lorsqu'elle est frappée par le rayonnement alpha de l'uranium. Enfin, la fission spontanée de l'uranium n'est pas négligeable et fournit quelques neutrons d'amorçage.

Tandis que la réaction en chaîne s'établit, l'équilibre est essentiellement instable. Ou la chaîne est « divergente », et alors le nombre de neutrons se multiplie sans cesse, l'énergie se libère en quantité toujours plus grande, la température s'élève dans la pile et, si l'on n'intervient pas, risque de fondre les matériaux, de faire bouillir l'eau lourde (s'il s'agit d'une pile à l'eau lourde) et même de provoquer un incendie, d'ailleurs limité puisque la pile s'arrêtera d'elle-même en se désagrégeant. Ou alors la chaîne est « convergente » et l'énergie qu'elle libère tend vers zéro au bout d'un temps plus ou moins long. Le réglage à une puissance déterminée s'effectuera en réglant le nombre de neutrons libres qu'on mesurera dans la pile au moyen d'un dispositif approprié, ou en mesurant la température de la masse. On calcule qu'un watt correspond à 30 milliards de fissions par seconde. A ce régime, une pile « brûle » un millionième de gramme d'uranium par jour. On peut très aisément modifier le régime énergétique de la pile, passer par exemple, de plusieurs kilowatts à quelques milliwatts en introduisant dans la pile une barre de cadmium ou d'acier au bore, qui sont de puissants absorbants de neutrons. Un réglage plus « fin » peut être obtenu, comme sur la pile française, en interceptant par un absorbant en cadmium une partie des neutrons renvoyés par le réflecteur de graphite sur la pile.

Lorsque la pile cesse de fonctionner, elle continue à être dangereuse pour les opérateurs, car les impuretés radioactives que constituent les fragments de fission « meurent » lentement en émettant des rayonnements nocifs.

Ces impuretés qui s'accumulent dans la pile l'« empoisonnent » peu à peu. Au même titre que les autres impuretés, elles absorbent des neutrons en pure perte et diminuent le rendement de la réaction. Il est donc indispensable périodiquement, en fonction du régime de la pile, d'extraire les blocs d'uranium et de les traiter chimiquement pour éliminer les produits de fission. Mais ces impuretés constituent aussi une richesse, car on peut les utiliser, après séparation, dans une foule de domaines, tant pour la recherche scientifique que comme agents thérapeutiques.

Bombes et centrales atomiques

L'uranium à 238 particules, celui qui ne manifeste pas de fission, joue un rôle néfaste dans les piles telles que nous venons de les décrire. On peut donc songer à l'éliminer partiellement. On obtient alors une pile « enrichie » à rendement élevé.

Si l'on parvient, comme on l'a fait en Amérique, à l'éliminer totalement, opération très difficile et coûteuse, on aboutit, par suppression du ralentisseur, à une explosion formidable, à la bombe atomique genre Hiroshima.

Mais ce même uranium à 238 particules, lorsqu'il capte un neutron dans une pile ordinaire, se transforme en peu de temps en des éléments transuraniens, dont le plutonium 239 qui possède une aptitude à la fission comparable à celle de l'uranium à 235 particules. On a pu en préparer, en Amérique, des quantités importantes, et c'est lui qui constituait, semble-t-il, la bombe de Nagasaki.

Dans une pile construite suivant le schéma classique, il se forme donc constamment du plutonium 239 qui, étant capable de subir la fission au même titre que l'uranium 235, est susceptible de se substituer à lui progressivement et de compenser son usure au cours du fonctionnement. On aperçoit là la possibilité de réaliser des piles « autorégénératrices », capables de « brûler » non seulement l'uranium 235 qu'elles contiennent, mais aussi l'uranium 238, d'où une économie considérable, ce dernier étant cent trente neuf fois plus abondant.

De ce qui précède on peut conclure qu'une pile atomique est une centrale d'énergie assez volumineuse puisque, pesant plusieurs tonnes par elle-même, il faut en outre lui ajouter le poids, encore plus considérable, de son enveloppe en béton. Il est donc probable que l'énergie thermique des piles, transformée ou non en énergie électrique, n'est pas près de remplacer celle des combustibles liquides sur les voitures ou les avions. Par contre, on peut nourrir l'espoir de les adapter à la propulsion de gros navires ou pour fournir de l'énergie à des contrées défavorisées pour leur ravitaillement en combustibles solides ou liquides. Dès à présent, ces applications sont à l'étude dans le monde entier.

M.-E. NAHMIA



Mme Irène Joliot-Curie, M. Francis Perrin et M. Frédéric Joliot devant le tableau de commande à distance de la pile atomique « Zoé » à Châtillon.