

# Le problème du PLUTONIUM

par

Bertrand GOLDSCHMIDT,

Chef du Service de Chimie Industrielle au Commissariat à l'Énergie Atomique.

*Le plutonium, élément de synthèse de la pile, est à la base de toutes les applications futures, militaires et pacifiques, de l'énergie nucléaire. C'est le premier élément produit en quantité par l'alchimie moderne, et bien que cet élément ne soit pas l'or, il sera dans quelques décades le signe de la puissance et de la richesse des États qui en posséderont, à moins que d'ici là les nations se soient fondues dans un monde unifié devant la menace que représente ce même plutonium.*

*Bertrand Goldschmidt a bien voulu retracer ici l'histoire de la découverte de cet élément et de son isolement et étudier dans son ampleur le problème de sa production et son extraction chimique à partir des piles atomiques.*

*Rappelons que Bertrand Goldschmidt, membre du Comité scientifique au Commissariat à l'Énergie atomique, a été le seul Français qui ait travaillé en 1942, en Amérique, dans le groupe atomique de Chicago avec le professeur Seaborg.*

*Bertrand Goldschmidt dirige en France la production de l'uranium utilisé pour construire les piles. Il aura aussi, d'ici peu, la responsabilité d'extraire les produits de fission et les petites quantités de plutonium qui s'accumulent dans la pile de Châtillon actuellement en fonctionnement.*

C'est pour essayer de produire des éléments transuraniens que, en 1934, Fermi bombarde l'uranium par des neutrons. Devant la complexité du mélange de radioéléments produits et la difficulté de les identifier chimiquement, Fermi abandonna le problème qui fut repris en 1935 par Hahn, Meitner et Strassman, à Berlin; ceux-ci, au bout d'un an de recherches, crurent avoir réussi à résoudre ce « puzzle chimique » et donnèrent à la vingtaine de radioéléments présents des identités allant du radium 88 à la case nouvelle 97 (1), en passant par tous les homologues supérieurs de l'uranium, le quatre-vingt-douzième et dernier élément de la classification à cette date.

Irène Joliot et Savitch, l'année suivante, doutant des résultats de Hahn, concentrèrent leurs efforts sur l'identification d'un seul de ces radioéléments, pensant qu'il était impossible de s'attaquer à tout le mélange d'éléments à la fois. Ils réussirent à démontrer que les propriétés chimiques de ce radioélément ressemblaient de très près à celles d'un élément bien connu, le lanthane, situé au milieu de la classification périodique.

Forcés par ce dernier travail de vérifier à nouveau leurs conclusions antérieures, Hahn et Strassman allaient être enfin conduits sur la vraie piste. Utilisant le même processus de cristallisation fractionnée qui, quarante ans auparavant, avait permis aux Curie de trouver le radium, Hahn montra que les radioéléments formés dans l'action des neutrons sur l'uranium se comportent chimiquement en tous points comme des éléments du milieu de la classification périodique. Ils en étaient en réalité des isotopes et trois mois après la publication de Hahn, qui est de fin 1938, la preuve physique de la fission du noyau d'uranium était donnée indépendamment par les physiciens du monde entier, Frisch à Copenhague, Joliot à Paris, Fermi et d'autres aux États-Unis et Bretcher en Angleterre.

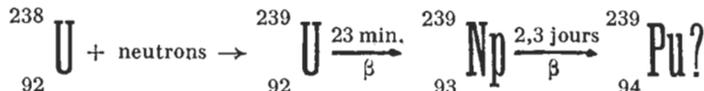
Sous l'impact d'un neutron, le noyau d'uranium se fend en deux morceaux de poids inégal. Tous ces « produits de fission » sont des radio-isotopes d'éléments situés vers le milieu de la classification périodique (1). Ils contiennent un excès de neutrons par rapport à leurs isotopes stables, et sont radioactifs  $\beta$ . Ils se désintègrent par des séries de désintégrations  $\beta$  jusqu'à ce que la série ou chaîne de fission aboutisse à un isotope stable.

Les deux produits de fission sont projetés avec une énergie considérable de 200 millions d'électrons-volts — de plus la fission s'accompagne de l'émission de neutrons secondaires (2 à 3) qui peuvent à leur tour créer de nouvelles fissions, et ainsi de proche en proche, par boules de neige, provoquer la réaction en chaîne divergente.

L'uranium est composé de deux isotopes 235 et 238, l'isotope 235

étant le plus rare, seulement 1/140 du mélange. Des raisons théoriques puis une preuve expérimentale montrèrent bientôt que l'uranium 235 était le responsable de la fission. Que devenait l'uranium 238 ? Il paraissait devoir être une gêne dans la possibilité de réaction en chaîne à partir de l'uranium naturel, car il capturerait aussi une certaine quantité de neutrons qui étaient perdus de ce fait dans le processus de multiplication. Vers 1940 il devint clair en France et aux États-Unis que la réaction en chaîne divergente ne pourrait être obtenue à partir de l'uranium naturel qu'en mélangeant celui-ci avec un élément léger, peu absorbateur de neutrons, qui, en ralentissant les neutrons secondaires, améliorerait leur probabilité de redonner une fission avec l'uranium 235. Les ralentisseurs les plus favorables sont l'eau lourde, le graphite et le béryllium.

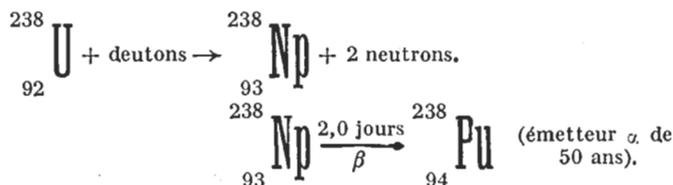
En 1940, McMillan et Abelson réussissaient à prouver que l'uranium 238, par capture d'un neutron, donne naissance à un isotope de l'uranium à vie courte de vingt-trois minutes, émetteur  $\beta$  qui se désintègre en un isotope de l'élément nouveau 93 (nommé maintenant neptunium) émetteur  $\beta$  de 2, 3 jours de période d'après la réaction :



Ils avaient réussi à isoler le premier élément transuraniens, celui que Fermi et Hahn et leurs écoles avaient en vain cherché à identifier.

Ayant concentré une quantité non pondérable du neptunium de 2, 3 jours, ils essayèrent d'isoler son descendant radioactif, qui devait appartenir à la quatre-vingt-quatorzième case de la classification; ils ne purent déceler de rayonnement et conclurent que si ce descendant était radioactif, il devait avoir une très longue période.

En décembre 1940, Seaborg, Kennedy et Wahl bombardèrent une cible d'uranium par les deutons de 16 millions de volts du grand cyclotron de Californie et obtinrent la réaction nucléaire suivante :



(1) Voir, pour la signification de case ou numéro atomique, Atomes n° 14, page 155.

C'est-à-dire que, par capture d'un deuteron et expulsion de deux neutrons, l'uranium 238 est transmuté en un neptunium 238, émetteur  $\beta$  d'une période de deux jours.

D'après les propriétés chimiques découvertes précédemment pour le 93, l'isolement d'une source intense de neptunium 238 était possible avec séparation complète de toute trace d'uranium et de rayonnement  $\alpha$  de ce dernier.

Après avoir laissé cette source décroître, ils trouvèrent une substance émettrice  $\alpha$  qu'ils isolèrent et dont ils purent étudier les principales propriétés chimiques par la méthode classique de la chimie radioactive : la méthode des entraîneurs. Il s'agissait d'un isotope de l'élément 94, à qui ils donnèrent le nom de plutonium.

L'étude des propriétés chimiques de cet isotope allait permettre ensuite de pouvoir isoler son isotope 239 à vie plus longue.

En 1941 Seaborg, Kennedy, Wahl et Segré séparaient quelques microgrammes du plutonium 239, ils montraient que ce dernier était un émetteur  $\alpha$  de période longue de vingt-quatre mille ans ; de plus, et ceci était un point capital, ils prouvaient que le plutonium 239 était un combustible nucléaire comme l'uranium 235, c'est-à-dire qu'il subissait la fission par neutrons avec émission probable de plusieurs neutrons secondaires.

Il est intéressant de remarquer que le plutonium est le propre parent radioactif de l'uranium 235, se désintégrant avec une période de vingt-quatre mille ans d'après la réaction



Ainsi une bombe au plutonium deviendrait en vingt-quatre mille ans une bombe moitié plutonium moitié, uranium 235.

Toutes ces recherches sur l'élément 94 avaient été conduites dans le plus grand secret, l'importance en devenait considérable, car jusque-là le seul moyen de réunir les kilogrammes de combustible nucléaire nécessaires à la production d'une bombe atomique était d'effectuer les laborieuses séparations isotopiques des deux uranins. Brusquement une nouvelle solution était apportée : si l'on pouvait réussir à faire fonctionner la réaction en chaîne dans l'uranium naturel, il serait possible d'y former par transmutation, à partir de l'uranium 238, du plutonium qui devrait pouvoir se séparer, sans trop de difficultés, de l'uranium dont il diffère autant que le fer du nickel.

C'est fin 1941, peu avant Pearl Harbour, que les États-Unis prirent la décision de s'engager à fond dans la réalisation de l'arme atomique. Un groupe fut créé à Chicago sous la direction de A.-H. Compton ; l'équipe de Fermi et de Szilard qui étudiait le système uranium-graphite, appelée de New-York, y fut réunie à l'équipe de Seaborg venue de Californie. Leur tâche était d'établir :

1° Si une pile au graphite peut fonctionner ;

2° S'il est possible de mettre au point une méthode chimique d'extraction du plutonium formé dans cette pile.

Le groupe prit le nom de Metallurgical Laboratory et commença à fonctionner en avril 1942. Dès juillet 1942, plus de cent travailleurs scientifiques étaient à l'œuvre, dispersés dans l'université de Chicago. Une merveilleuse atmosphère d'enthousiasme régnait dans ce groupe que j'eus la chance de joindre à cette époque pour travailler avec Seaborg et son groupe.

On y apprenait quelque chose de beaucoup plus important que des connaissances techniques, on y apprenait à travailler en équipe. Seaborg avait trente et un ans et il était l'aîné des trente chimistes qu'il dirigeait. Un certain mystère régnait, le plutonium s'appelait en code tantôt « cuivre », tantôt 49 (des derniers chiffres de 94 et de 239). En août 1942 l'équipe réussissait à isoler la première quantité visible de plutonium (un cinquième de milligramme) à partir de quelques centaines de kilos de sels d'uranium bombardés par le cyclotron géant de Californie. Quand, le 18 août 1942, à la réunion des chercheurs du projet (réunion hebdomadaire qui, de séance en

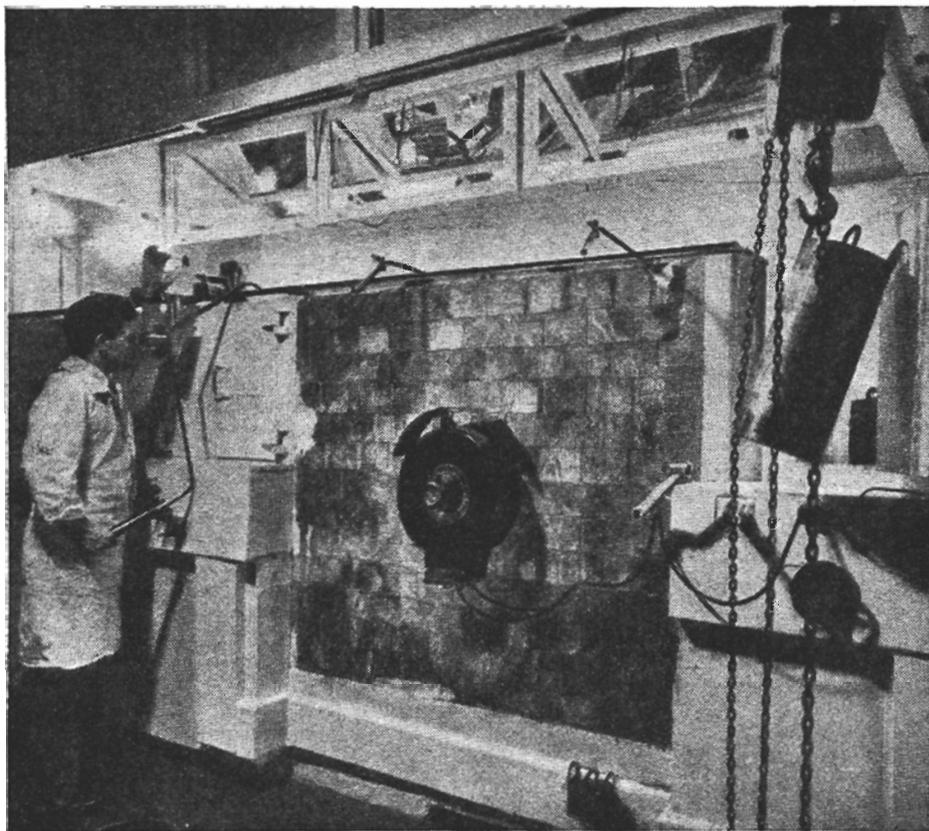


Photo 1. — Devant le mur de protection l'opérateur procède à distance à une manipulation d'un composé de plutonium. Il suit dans la lunette télescopique les manœuvres qu'il exécute par l'intermédiaire d'un levier de commande. Les trois glaces que l'on voit à la partie supérieure de la photo donnent l'image de ce qui se passe derrière le mur.

séance, voyait croître le nombre des chercheurs avec une cadence digne de la réaction en chaîne), Seaborg se leva pour annoncer qu'il avait vu pour la première fois un petit peu de plutonium, sous la forme de sel de couleur rosée, Teller, le chef du groupe de physique théorique, demanda de quel sel il s'agissait. Seaborg répondit qu'il ne pouvait le lui dire, tant le compartimentage était strict pour éviter les fuites. Le secret fut parfaitement gardé et les Allemands, jusqu'à la fin de la guerre, ignorèrent l'existence du plutonium.

\*\*\*

Pendant l'été 1942, plusieurs procédés de séparation du plutonium étaient étudiés sur des traces infimes. Chaque procédé étant basé sur les propriétés les plus caractéristiques du nouvel élément, il fallait l'isoler non seulement de l'uranium, mais aussi des multiples produits de fission radioactifs qui le souillent. Quelques mois plus tard, il fut nécessaire de choisir un procédé, car l'on devait déjà commencer les plans de l'usine qui traiterait l'uranium irradié dans les grandes piles.

Quatre types de méthodes principales étaient à l'étude : volatilité, adsorption, extraction par solvant et précipitation ; c'est ce dernier type de méthode qui fut adopté après que quelques ingénieurs, parmi l'élite de ceux de la firme Dupont de Nemours, eurent suivi de près les recherches en cours. La méthode de précipitation parut présenter le moins de risques, étant la plus proche des recherches déjà effectuées, basées surtout sur des réactions de co-précipitation et d'entraînement. Et c'est ainsi que le projet de l'usine d'extraction put être commencé dès 1943.

Les produits de fission, en raison de leurs rayonnements intenses, sont une gêne considérable dans le traitement qui ne se fait que quelques semaines après avoir sorti l'uranium irradié, de façon à éliminer par décroissance radioactive les produits de fission à vie courte.

Les usines d'extraction de plutonium sont des usines chimiques d'un genre tout à fait nouveau, entièrement manœuvrées à distance. Les barreaux sont traités dans une sorte de « cañon », couloir de quelques centaines de mètres de long, entre des murs de béton de plusieurs mètres d'épaisseur, où, par une série de cycles d'opéra-

tions chimiques basées sur les divers degrés d'oxydation du plutonium, cet élément se trouve finalement séparé de l'uranium et des produits radioactifs dont les rayonnements sont si intenses qu'aucun être humain ne doit s'en approcher.

Jamais l'industrie ne s'était trouvée devant pareil problème. Les installations à haute tension, les ateliers de gaz asphyxiants ou les usines chimiques fonctionnant sous haute pression sont souvent manœuvrés à distance, mais on peut toujours y couper le courant, vider et assainir les citernes ou faire tomber la pression avant de procéder à une réparation. Dans le cas des usines radioactives, toute réparation est absolument hors de question après que l'usine a commencé de fonctionner.

Une usine pilote fut construite à Oak Ridge pour traiter des barreaux irradiés provenant de la deuxième pile américaine (au graphite, de 1.000 kw, refroidie à air). Dès 1944, cette usine traitait chaque jour un tiers de tonne d'uranium irradié, et au 1<sup>er</sup> mars plusieurs grammes de plutonium avaient été extraits. Le rendement d'extraction, qui avait été de 50 % au début des opérations, atteignit 80 à 90 % au mois de juin 1944. Au fur et à mesure des progrès obtenus, des modifications correspondantes étaient apportées dans l'aménagement de l'usine de Hanford, qui devait traiter une matière première à la fois beaucoup plus active et beaucoup plus concentrée en plutonium, puisqu'il s'agissait de traiter des barreaux provenant de piles au graphite (refroidies à l'eau), probablement de plusieurs centaines de milliers de kilowatts.

Dans la mise en route de l'usine pilote, un des appareils s'étant détérioré, on put le remettre en fonctionnement en ayant recours à cent cinquante manœuvres qui ne restèrent chacun qu'une deminute auprès de l'appareil, le service médical ayant interdit un contact plus prolongé. Malgré leur extrême complication, ces usines d'alchimie moderne furent construites sur les données chimiques obtenues sur moins d'un milligramme de produit et le succès fut consacré par l'excellence des rendements obtenus.

Une fois le plutonium séparé, il fallut apprendre à le transformer en métal très pur pour fabriquer la bombe, travail extrêmement délicat, car le plutonium lui-même est mortel si l'organisme en fixe dans les os ou les reins moins d'un centième de milligramme (1), et il en faut des kilogrammes dans chaque bombe atomique.

Un service de santé considérable doit surveiller les travailleurs, dont les vêtements sont lavés chaque jour et qui de plus sont munis d'instruments permettant de connaître la dose de rayonnement reçue quotidiennement. Le service de santé a le droit d'arrêter toute opération en cours s'il la juge dangereuse, quelle qu'en soit l'importance.

C'est ainsi que, dès juin 1945, les kilogrammes de plutonium préparés furent employés dans la première bombe atomique, celle qui fut essayée au Nouveau-Mexique le 16 juillet de cette même année, et dans celle de Nagasaki du 9 août, qui devait mettre le point final à la guerre du Japon, tout juste trois ans après que la première quantité visible de l'élément eut été isolée. Seule, la technique américaine pouvait réussir un tel tour de force.

### *Les données du problème.*

Après ce long aperçu historique, je voudrais maintenant étudier avec plus de précision les données du problème.

#### *1° Quantité de plutonium formé.*

Dans une pile, il se consume de l'uranium 235 avec un dégagement d'énergie de 200 millions d'électron-volts (soit  $3,2 \cdot 10^{-4}$  ergs.) par fission. Il en découle que la fission d'un gramme d'uranium 235 dégage une énergie d'environ 20.000 kilowatt-heure, ou encore qu'une pile de 1.000 kw. consume environ un gramme d'uranium 235 par jour.

La quantité de plutonium formé dépend pour chaque fission du nombre de neutrons secondaires capturés par le 238, en plus du neutron qui doit nécessairement produire à nouveau la fission dans l'uranium 235 pour que la réaction en chaîne se poursuive. Le rapport Smyth nous dit que l'on peut deviner que ce nombre est compris entre 0,6 et 2, c'est-à-dire que pour produire un gramme de plutonium par jour il faut une pile de puissance comprise entre 500 et

Ci-contre : Photo 3. — Intérieur d'un laboratoire à plutonium. Pour éviter les graves dangers du rayonnement, le photographe a dû opérer en moins d'une minute.

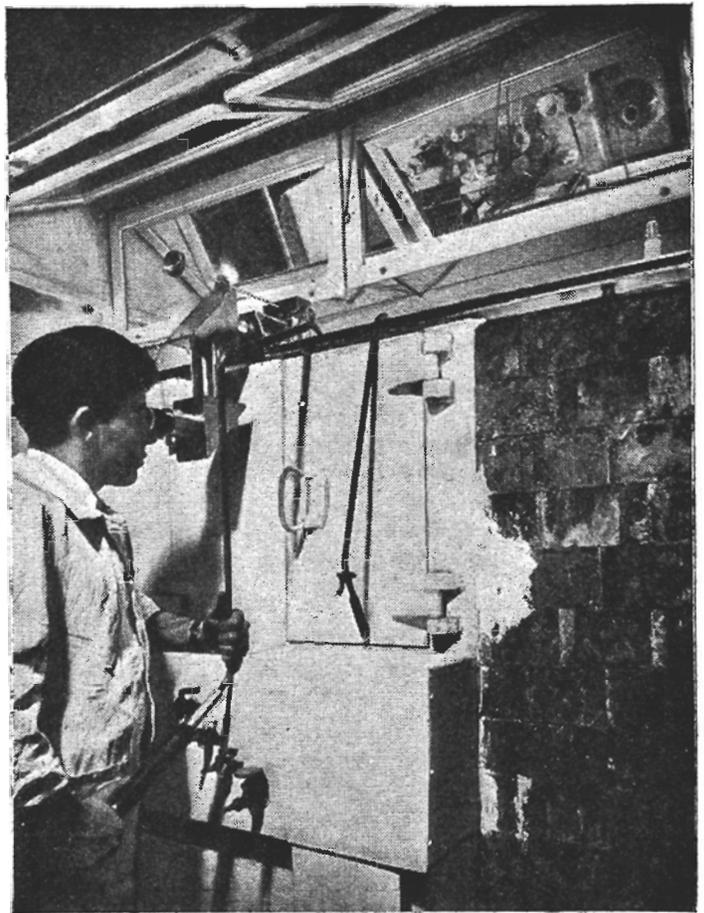
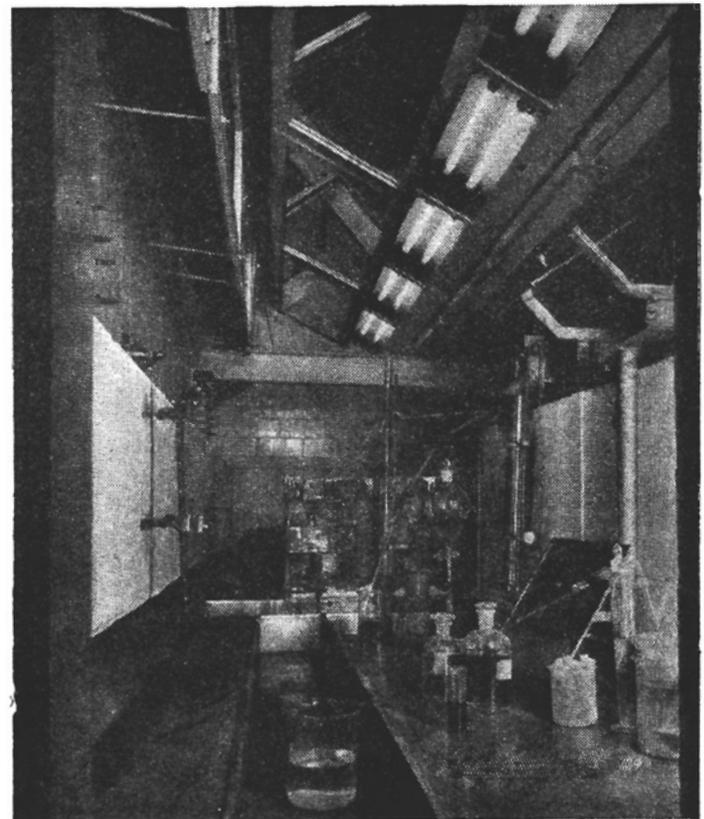


Photo 2. — Détail de l'opération présentée dans son ensemble sur la photo 1.



1.500 kw., ce qui nous montre que la quantité de plutonium formé est du même ordre de grandeur que la quantité d'uranium 239 consommé dans le même temps.

Ainsi, on peut voir que :

Une pile de 1 kw produit entre 0,6 et 2 milligrammes par jour.  
 — 1.000 kw — 0,6 et 2 grammes par jour.  
 — 100.000 kw — 60 et 200 grammes par jour.

Nous venons de classer les piles dans les trois ordres de grandeur qu'elles ont actuellement, piles expérimentales de puissance presque nulle, comme celle de Châtillon, piles de moyenne puissance et enfin piles de grande puissance, dites piles de production comme celles de Hanford.

## 2° Intensités des radiations mises en jeu.

Après un temps de fonctionnement de la pile de quelques mois, long par rapport à la plupart des périodes des produits de fission, on tend vers un équilibre où à chaque fission correspondent environ dix désintégrations  $\beta$  : quatre en moyenne pour chacune des deux chaînes de fission, en plus de celles de l'uranium 239 et du neptunium 239. Il est ainsi facile de calculer qu'à l'équilibre le nombre de désintégrations par secondes est  $3.2 \cdot 10^{14}$  par kw. de puissance de la pile, soit une activité en curies (1) de désintégrations  $\beta$  de :

$$\frac{3.2 \cdot 10^{14}}{3.7 \cdot 10^{10}} \text{ 8.000 curies de } \beta \text{ par kw.}$$

Cette activité décroît rapidement d'un facteur 10 environ, au bout d'une heure d'arrêt de la pile, et encore du même facteur 10 dans les trois semaines qui suivent l'arrêt de la pile pour ne plus décroître qu'assez lentement. En gros, un mois après l'arrêt d'une pile qui a atteint son équilibre radioactif, l'intensité totale de l'uranium de celle-ci est réduit à environ 100 curies de désintégration  $\beta$  par kw. de puissance de la pile en marche.

Au bout d'un mois de décroissance des produits de fission, il n'y a plus d'émetteurs  $\gamma$  très pénétrants, en dehors du couple Lanthane (40 h) et Baryum (125 j) qui décroît avec une période de 12.5 jours, émettant le rayonnement pénétrant du lanthane de 40 heures et l'on peut admettre que le rayonnement pénétrant est dix fois moins intense que celui du radium à quantités égales de curies de désintégration.

Finalement, nous pouvons conclure qu'après un mois d'arrêt, une pile est réduite à une intensité pénétrante équivalente en grammes de radium à dix fois le nombre de kilowatts de puissance à laquelle elle fonctionnait.

Du point de vue de la décroissance des produits de fission, il n'y a pas grand intérêt à attendre plus d'un mois pour traiter l'uranium irradié ; toutefois, il faut tenir compte de la présence du seul produit de fission gazeux à vie longue, le xénon (5,4 jours) dont la présence nécessite, dans une grande usine de plutonium, l'adjonction d'une cheminée d'évacuation des gaz radioactifs ; au bout de deux mois l'activité du xénon est diminuée de plus d'un facteur mille et l'on a ainsi intérêt à laisser décroître plus longtemps l'uranium irradié avant de le traiter.

## 3° Cycle d'extraction de l'uranium de la pile.

La donnée qui conditionne la taille de l'usine chimique est la quantité d'uranium qu'il faut y traiter par jour.

Admettons que tous les jours on traite une fraction  $\frac{1}{N}$  de l'uranium

total contenu dans la pile et que l'on remplace cette fraction par la même quantité de barreaux d'uranium frais, et ainsi de suite. Au bout de N jours l'on reviendra à ces nouvelles barres qui con-

tiendront  $\frac{1}{N} \times N$  de la production journalière de plutonium. C'est-à-

dire que, quelle que soit la longueur du cycle d'extraction, une fois l'équilibre atteint, l'usine de traitement chimique aura à extraire tous les jours la quantité de plutonium produite par jour dans la pile.

(1) (1) Le curie est la quantité de substance radioactive qui subit autant de désintégration qu'un gramme de radium, soit  $3,7 \cdot 10^{10}$  désintégrations par seconde.

Le problème du cycle est en réalité plus compliqué, du fait que l'uranium au centre de la pile est plus irradié, c'est-à-dire plus concentré en plutonium que l'uranium situé vers l'extérieur ; en pratique, on équilibre en réalisant une moyenne pour les barreaux à extraire.

Plus le cycle est long, moins la quantité d'uranium à traiter est grande, à production égale de plutonium, et, si la pile a atteint son équilibre, moins l'activité mise en jeu dans chaque opération chimique est grande.

L'avantage du cycle long ne se limite pas aux gains sur la taille de l'usine et sur l'activité mise en jeu, mais aussi sur le fait qu'il faut fournir moins d'uranium frais de remplacement. On est, par contre, limité par la hâte où l'on est d'obtenir le plutonium et aussi la nécessité où l'on peut être de devoir extraire le plutonium et les produits de fission. A chaque gramme de plutonium formé, il y a un gramme de produits de fission formé, correspondant à la fission de l'uranium 235, et petit à petit s'accumulent dans l'uranium de la pile des quantités croissantes des isotopes stables, fin des chaînes de produits de fission ; certains d'entre eux auront forcément de larges sections efficaces de capture aux neutrons et petit à petit empoisonneront le fonctionnement de la pile. Avant de se lancer sur la production de plutonium à grande échelle, il faut déterminer d'abord la vitesse d'empoisonnement de l'uranium par les produits de fission accumulés, de façon à limiter le cycle d'extraction.

Il faut enfin remarquer que si l'on a une pile de grande puissance et un cycle long, la concentration de plutonium dans les barres ne sera plus négligeable par rapport à celle de l'uranium 235 et qu'une certaine fraction du plutonium formé commencera à être consommée.

Prenons pour fixer les idées un exemple : le rapport Smyth nous dit qu'il y avait dans la pile de Fermi six tonnes de métal et que cette quantité était insuffisante pour le démarrage de la pile, qui fut terminée avec de l'oxyde. Supposons, pour fixer les idées, qu'une pile contienne dix tonnes d'uranium et que cette pile fonctionne à 1.000 kw., cela signifie qu'un mois après l'arrêt de la pile les dix tonnes d'uranium auraient une activité  $\gamma$  voisine de celle de 10.000 grammes de radium, soit donc un gramme de radium par kilo d'uranium.

Si on prend un cycle de dix jours, il faudra extraire une tonne par jour et la remplacer par de l'uranium frais : l'activité mise en jeu après un mois de décroissance sera équivalente à 1 kilo de radium.

Si on prend un cycle de cent jours, l'usine aura à traiter seulement 100 kilos par jour avec une activité équivalente à 100 grammes de radium.

L'on voit par ces exemples que si l'on a affaire à une pile de basse puissance, comme celle de Châtillon qui peut fonctionner en moyenne à 5 kw. et si l'on prend un cycle long d'environ cent jours, l'activité mise en jeu devient voisine de 0,5 gramme de radium, ce qui est relativement très facile à manier. Nous avons l'intention de construire dans les mois qui viennent une petite installation de traitement des barreaux de notre pile, afin d'obtenir les quelques milligrammes de plutonium nécessaires à l'étude chimique de cet élément encore inconnu en France.

## L'extraction chimique du plutonium.

Le problème posé consiste à séparer le plutonium de la masse de l'uranium et de l'activité des produits de fission, car l'on tient à manipuler du plutonium sans rayonnements pénétrants.

Reprenons l'hypothèse précédente d'une pile de 1.000 kw. contenant 10 tonnes d'uranium. La production de plutonium étant de l'ordre de grandeur d'un gramme par jour (comprise entre 0,6 et 2 grammes par jour), la concentration moyenne du plutonium par tonne d'uranium sera au bout de dix jours environ de 1 gramme, et au bout de cent jours de 10 grammes.

Ce ne sont pas des concentrations très faibles, ce sont des concentrations plus grandes que celle du radium dans les minerais d'uranium, qui dépassent rarement 100 mg. à la tonne.

La concentration du plutonium serait de  $10^{-6}$  ou  $10^{-5}$  suivant les deux cas envisagés. Il serait raisonnable d'obtenir le gramme de plutonium avec moins de 1/10 de millicurie de rayonnement pénétrant du aux produits de fission, c'est-à-dire que, suivant le cas, il faudra descendre à  $10^{-6}$  ou  $10^{-5}$  de l'activité initiale de ceux-ci. On peut donc dire en gros que l'opération d'extraction du plutonium est une opération où il faut concentrer et décontaminer avec un facteur de l'ordre du millionième.

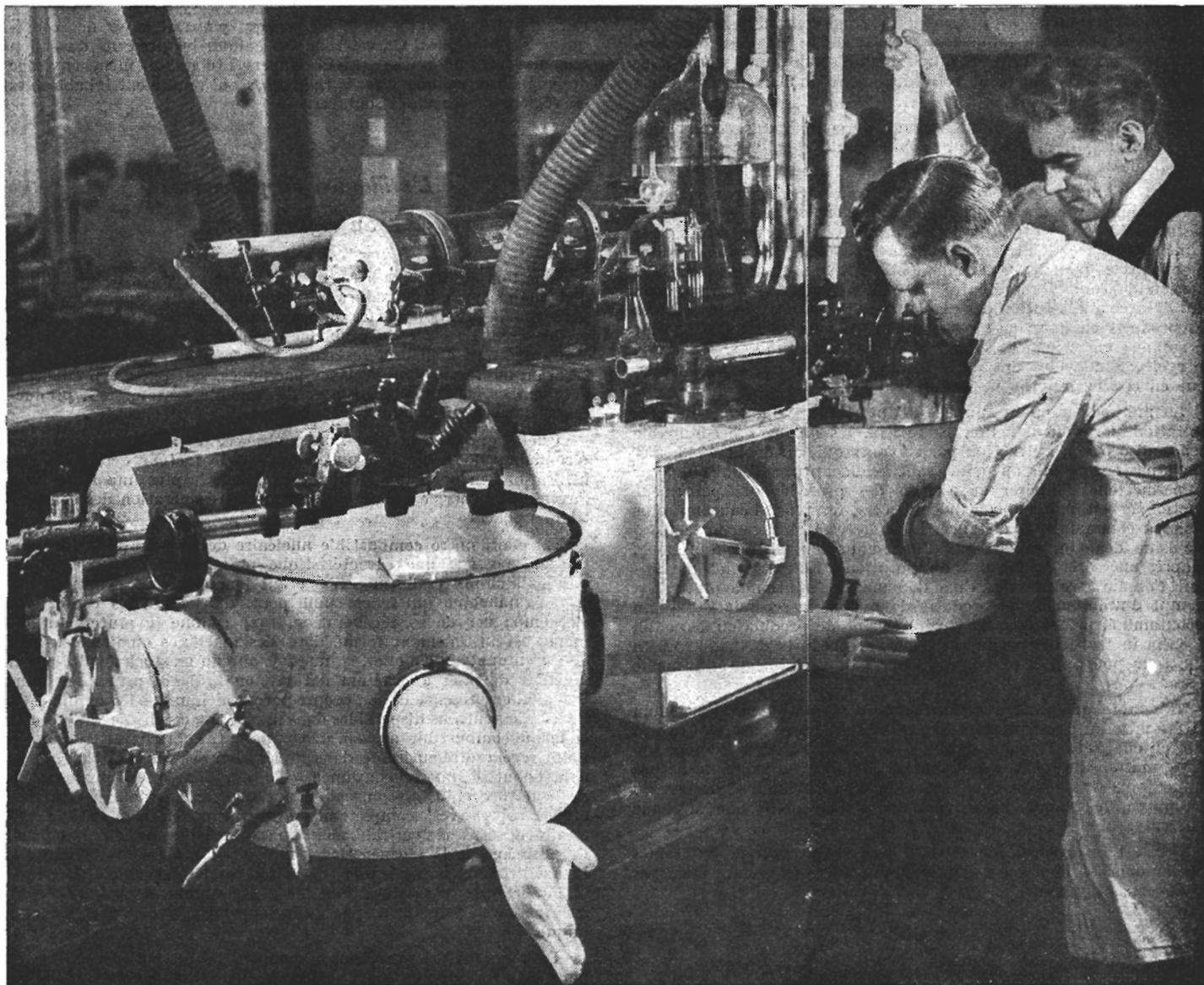


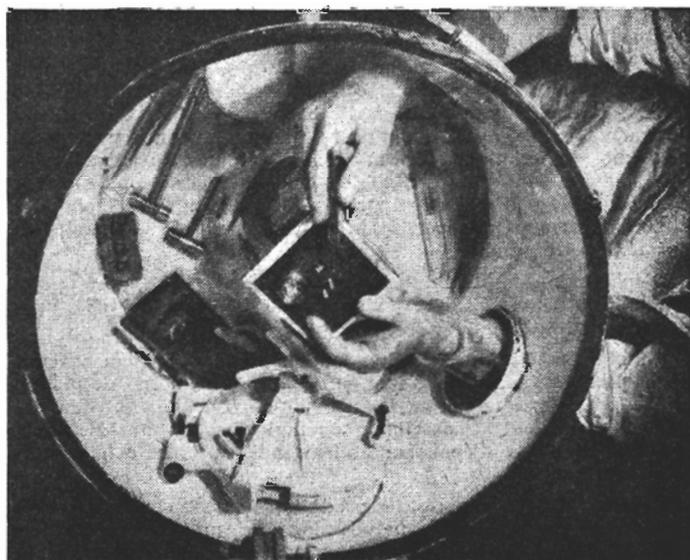
Photo 4. — Pour éviter aux opérateurs de respirer des particules de substances dangereuses, on utilise ces cuves étanches balayées par un courant de gaz inerte qui est évacué par les gros tuyaux. Des gants de caoutchouc, qu'ils enflent en faisant momentanément le vide dans les cuves, permettent à ces « néo-chirurgiens » de faire toutes les opérations qu'ils suivent par la plaque vitrée de la partie supérieure de la cuve, comme on le voit sur la photo ci-dessous.

La séparation du plutonium de l'uranium même en présence de grandes quantités relatives de ce dernier élément n'est pas difficile car ces deux éléments, bien que voisins dans la classification périodique, sont nettement différents. Ainsi, si l'on dissout un barreau d'uranium contenant du plutonium dans de l'acide nitrique, l'addition d'acide fluorhydrique à cette solution précipite un fluorure de plutonium insoluble, tandis que l'uranium dans ces conditions reste en solution. De nombreuses autres réactions distinguent les deux éléments et ont été publiées dans la littérature récente.

Une fois que l'on est en présence d'un milligramme de plutonium qui correspond à  $138.10^6$  désintégrations  $\alpha$  par minute, il n'est pas difficile d'étudier les diverses propriétés chimiques et de concevoir des méthodes de séparation basées sur des procédés qui peuvent être de voie sèche, de voie aqueuse, d'absorption ou d'extraction par solvants.

Les principaux produits de fission sont des radio-isotopes du xénon, du strontium, du baryum, du lanthane, de l'yttrium, du cérium, du zirconium, du niobium, de l'iode et du ruthénium.

Il faut surtout se débarrasser totalement des émetteurs de rayons gamma, le lanthane 40 heures et son parent le baryum 12.5 jours, le zirconium 65 jours et le niobium 35 jours, ainsi que le ruthénium 42 jours. Ces trois derniers radioéléments ont été identifiés par



Les photos illustrant cet article sont de F. W. GORO. Life Magazine.

Perlman et moi-même à Chicago en 1942, au cours d'un travail qui consistait à établir la table des produits de fission avec leur proportion en fonction : 1° de la durée d'irradiation d'un barreau dans la pile, et 2° de la durée de refroidissement du barreau en dehors de celle-ci.

Ce tableau, une fois établi, permet de connaître la composition radiochimique d'un barreau, connaissant son histoire antérieure.

Dans les méthodes de précipitation, on entraîne par exemple le plutonium avec un sel insoluble d'un élément avec lequel il est voisin, certains des produits de fission peuvent être entraînés pour la même raison ; d'autres, au contraire, ont une tendance à rester en solution et pour les y maintenir et éviter que l'absorption d'une fraction de ceux-ci représente une radioactivité assez grande, on peut ajouter à la solution des quantités notables des isotopes stables des produits en question ; ces quantités d'isotopes stables servent de support et retiennent en solution ces radioéléments. Une série de cycles élimine les uns après les autres les produits de fission, tout en concentrant le plutonium.

La méthode adoptée aux États-Unis fut une méthode de précipitation par voie aqueuse. En réalité, les autres procédés, voie sèche, adsorption, extraction par solvants qui, au début 1943, n'étaient pas encore mis au point, sont beaucoup plus séduisants, car ils permettent d'espérer de réaliser des procédés qui pourraient fonctionner en marche continue et être, de plus, beaucoup plus faciles à commander à distance. L'on arrivera sans aucun doute à une usine idéale où les barreaux d'uranium seront dissous à un bout, et après une série de colonnes d'absorption ou d'extraction par solvant, l'on aura trois sorties, l'une donnant une solution de plutonium exempt d'uranium et de produits de fission, la seconde l'uranium décontaminé, prêt à être renvoyé à l'usine de production de métal, et enfin la troisième produisant tous les produits de fission qui à leur tour pourront être séparés dans une installation du même genre.

Il semble que plus d'une méthode d'extraction du plutonium ait été mise au point pendant la guerre dans les pays anglo-saxons. Il a, en effet, été dit en 1945 aux États-Unis devant la commission d'information du Sénat, que les Américains ayant décidé de ne pas donner aux Britanniques leur procédé de séparation chimique du plutonium, le groupe anglo-canadien mit au point une méthode différente.

Ceci est un exemple de ce qu'il ne peut y avoir de véritables secrets dans le domaine technique, une fois les grands principes découverts et connus.

### *Les dimensions de l'usine.*

#### *La protection des travailleurs.*

Les dimensions de l'usine dépendent essentiellement de la quantité d'uranium à traiter par jour, c'est-à-dire de la durée du cycle adopté.

Si l'on a affaire à une méthode de précipitation, on peut rarement utiliser des solutions concentrées en uranium. La seule méthode pratique de dissolution des barreaux consiste à les traiter par l'aide nitrique, après avoir retiré l'aluminium qui les couvrait, par un moyen mécanique ou chimique. Les volumes sont alors importants, mais dès que l'on atteint le stade du procédé où l'on s'est débarrassé de la plus grande partie de l'uranium, l'on atteint des volumes beaucoup plus petits et les dimensions des appareils en sont réduites d'autant.

D'épais murs de plomb ou de béton doivent protéger les opérateurs, qui ne peuvent suivre les opérations que par des périscoopes ou des appareils de télévisée.

En gros, pour diminuer d'un facteur 10 le rayonnement émis par les produits de fission, il faut soit 5 ou 6 centimètres de plomb, soit 30 centimètres de béton. Il est facile de voir ainsi que dans les grandes usines d'extraction chimique américaines des murs de béton de plus d'un mètre d'épaisseur étaient indispensables à la protection du personnel.

De plus, une fois séparés, les produits de fission sont une source considérable de gêne, car on ne peut les jeter impunément dans les rivières ou dans les mers, sans risquer à la longue d'accroître la

radioactivité des eaux du globe, ce qui pourrait avoir des conséquences biologiques. On est réduit à enfouir les produits de fission dans des trous bétonnés, car leur danger est tel qu'on a même envisagé de les utiliser comme *poisons radioactifs* qui rendraient inhabitables les régions ou les villes souillées.

### *L'utilisation du plutonium.*

#### *Sa régénération.*

Une fois qu'un pays a réussi à produire un stock de plutonium d'au moins quelques dizaines de kilogrammes, nous pouvons considérer que la première partie du problème du plutonium a été résolue et dépassée. La suite du problème déborde le cadre de cet exposé. Elle consistera à utiliser le combustible nucléaire pur vers la destruction ou vers les applications pacifiques, soit pour la production des bombes, soit pour alimenter des machines atomiques, productrices d'énergie à combustible nucléaire pur ou concentré.

Quelle que soit la direction envisagée, le nombre de neutrons secondaires de fission du plutonium est le facteur décisif de son utilisation ; en particulier, dans le problème le plus important pour l'avenir de l'énergie atomique, celui de la régénération des combustibles nucléaires.

En effet, notre combustible nucléaire de transmutation, le plutonium, possède une caractéristique unique qui dépasse tout ce que les alchimistes du moyen âge ont jamais rêvé : sa combustion dans la machine qui le consume peut, dans certaines conditions, s'accompagner de sa régénération, tout comme le plutonium lui-même est initialement formé dans des machines où l'on consume de l'uranium 235. En effet, si, une fois obtenu un stock de plutonium à partir de piles à uranium naturel, on brûle ce plutonium dans une pile, en présence de son propre parent alchimique l'uranium 238, l'excès de neutrons disponibles dans la réaction en chaîne va reformer ce même combustible au sein de son parent. Si la quantité de plutonium régénéré récupérable dans l'opération est égale ou supérieure à la quantité initiale consumée, cela signifiera que l'uranium 238 de la nature (140 fois plus abondant que le 235) pourra être, par étapes successives, complètement transformé en combustible nucléaire, et sera alors véritablement un combustible nucléaire potentiel. Ce problème de la régénération s'appelle en anglais le « breeding ». La facilité avec laquelle cette opération serait réalisable et le temps et l'effort que nécessiterait un large programme de breeding sont les facteurs principaux du développement de l'énergie atomique.

Pour qu'il y ait régénération complète, il est indispensable que, pour chaque neutron provoquant une fission d'un noyau de plutonium, il y ait au moins deux neutrons secondaires susceptibles : l'un de continuer la réaction en chaîne et l'autre de former par capture dans l'uranium 238 le nouvel atome de plutonium.

L'efficacité de la régénération dépend de la valeur de ce nombre de neutrons secondaires fournis par la fission du noyau de plutonium. Sa valeur, connue du groupe anglo-américain, est encore tenue secrète.

Du point de vue pratique, non seulement le plan et le rendement du réacteur nucléaire seront importants, mais aussi le rendement des extractions chimiques qui deviendra fondamental, car tout rendement inférieur à 100 % influera défavorablement sur le degré de régénération. Le chimiste de ce nouveau domaine devra donc, dans l'avenir, arriver à obtenir des rendements presque parfaits dans les conditions vraiment acrobatiques des usines commandées à distance.

\* \* \*

Nous venons de voir rapidement l'extraordinaire histoire de la découverte de l'alchimie moderne, des problèmes qu'elle pose et les horizons merveilleux qu'elle ouvre. C'est à nous maintenant d'éviter que cette découverte puisse à nouveau servir sous sa forme destructrice en obtenant sur le plan mondial un contrôle international de l'énergie atomique, qui s'accompagnera, sur le plan de la recherche et des réalisations, des bienfaits de la collaboration internationale entre scientifiques et techniciens de ce domaine nouveau.